INVESTIGACIÓN Y CIENCIA | EL FUTURO DE LA FABRICACIÓN | LAGOS ALPINOS Y CAMBIO GLOBAL | FISURAS EN LA TABLA PERIÓDICA | N.º 443 | AGOSTO 2013

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Agosto 2013 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

MEDIOAMBIENTE
Lagos alpinos y cambio global

ETOLOGÍA
Imitación vocal entre animales

QUÍMICA
Fisuras en la tabla periódica

INFORME ESPECIAL
El futuro de la fabricación

La próxima revolución industrial

Robots jefes

Nuevos materiales

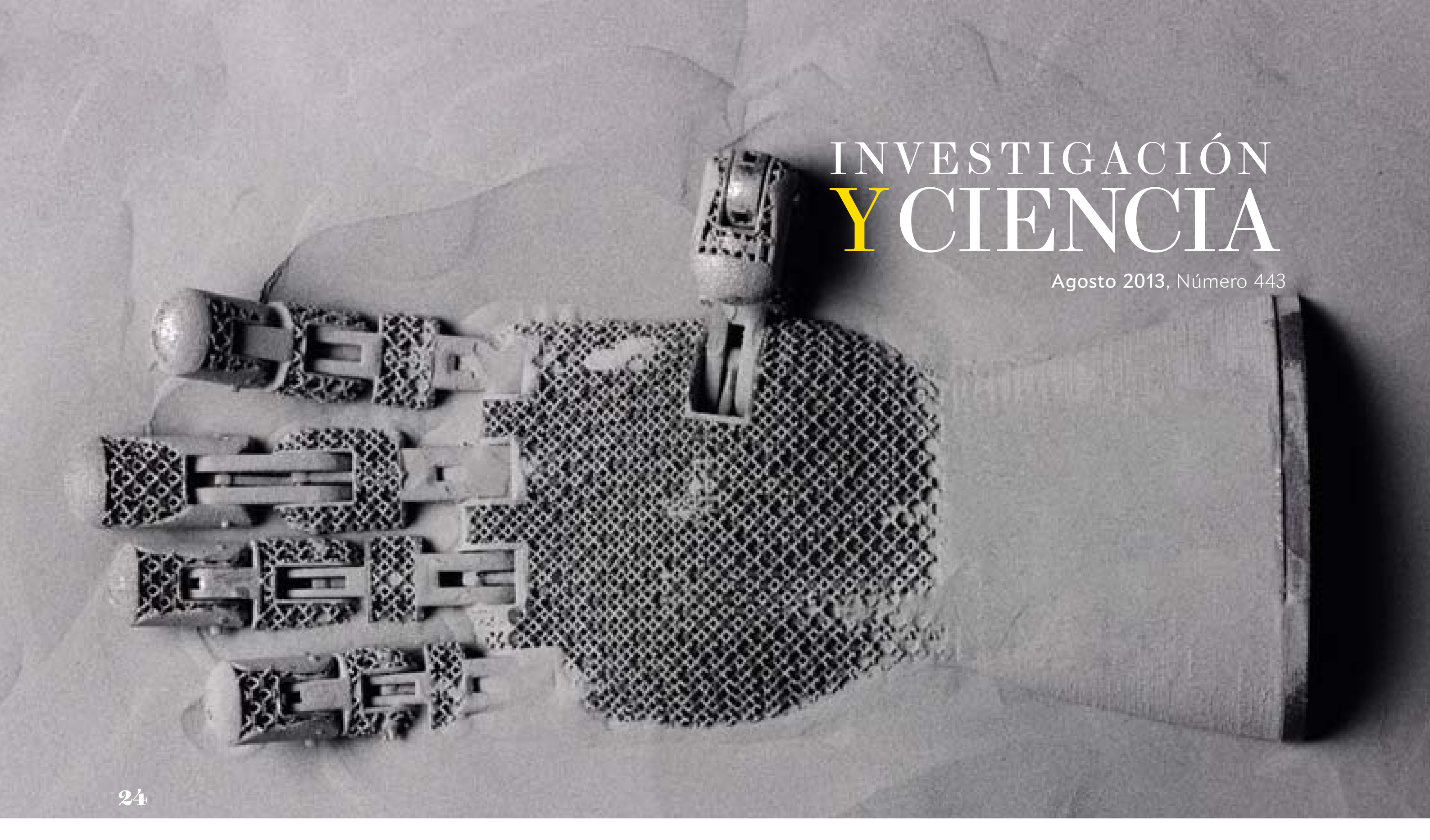
Impresión en 3D

Nanomáquinas

Fábricas virtuales

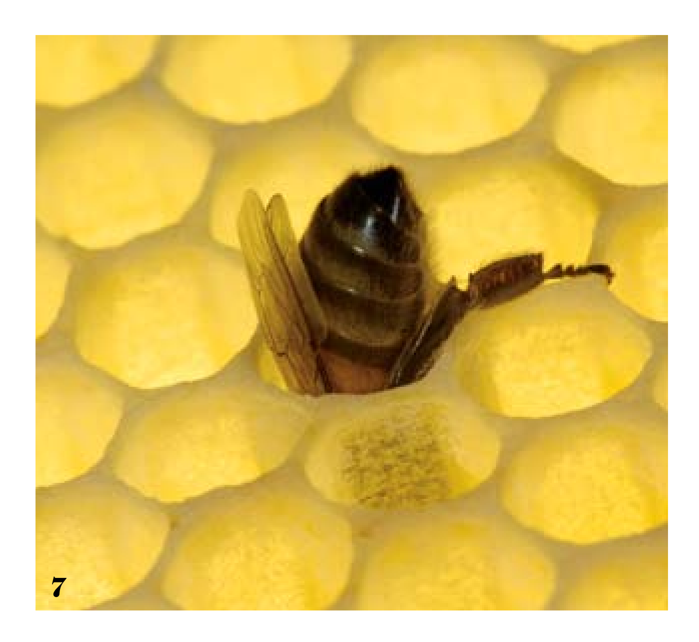


6,50 EUROS



ARTÍCULOS

TRAVIS RATHBONE



7



46



86

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Las nuevas técnicas para almacenar y procesar información prometen revolucionar la manera en que concebimos y fabricamos nuevos productos. En un futuro próximo, humanos y robots trabajarán codo con codo, la impresión en 3D permitirá construir objetos antaño imposibles de confeccionar y las simulaciones computarizadas someterán a prueba miles de posibles diseños antes de fabricar el primer prototipo. Ilustración de Justin Metz.



redaccion@investigacionyciencia.es



Febrero 2013

COMBATIR LA DEPRESIÓN

En el artículo «Terapia de la depresión» [Investigación y Ciencia, febrero de 2013], Robin Marantz Henig resume con acierto lo que hoy sabemos sobre la eficacia de los antidepresivos al afirmar que «dejan mucho que desear».

Sin embargo, existen alternativas. Varios estudios controlados aleatorios de gran calidad han demostrado que, tanto en pacientes que han sobrevivido a un cáncer como en otros grupos de población, el ejercicio aeróbico reduce los síntomas depresivos. Y al contrario de lo que ocurre con los efectos secundarios habituales de los antidepresivos (disfunción sexual, jaqueca, insomnio y náusea), los del ejercicio resultan maravillosos: refuerzo de la libido, mejoras en el sueño, reducción de la grasa corporal, aumento de la resistencia física y de la esperanza de vida, entre otros. A esto debemos añadir su bajo coste y la posibilidad de adaptarlo a las necesidades de cada paciente. ¿Acaso debemos recurrir siempre a los fármacos para combatir la depresión?

Blair T. Johnson
Linda S. Pescatello
Universidad de Connecticut

«¿Acaso debemos recurrir siempre a los fármacos para combatir la depresión?»

Blair T. Johnson y Linda S. Pescatello
Universidad de Connecticut

Uno de los posibles nuevos tratamientos analizados en el artículo «Terapia de la depresión» se centra en suprimir los procesos inflamatorios. Sin embargo, esta clase de sustancias reguladoras del sistema inmunitario pueden provocar también un indeseado efecto secundario: permitir la reactivación de una infección latente. Otros efectos no se limitan a las infecciones latentes, sino que pueden influir sobre infecciones activas pero que han sido pasadas por alto. En general, interferir con el sistema inmunitario tiene consecuencias.

Algunos investigadores están estudiando la relación entre microorganismos y los trastornos mentales. Es bien sabido que la sífilis provoca síntomas psiquiátricos. Lo mismo podría ocurrir con otros agentes infecciosos. En tales casos, lo deseable sería identificar y tratar también la infección.

Linda Finn
Gainesville, Georgia

EL CALENTAMIENTO DEL ÁRTICO

En «Inviernos extremos» [Investigación y Ciencia, febrero de 2013], Charles H. Greene explica por qué el deshielo de la banquisa ártica puede provocar inviernos inusualmente fríos en Estados Unidos y Europa.

Según el artículo, las fases negativas de la Oscilación Ártica (AO) y de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) se encuentran asociadas a fenómenos climáticos que favorecen que las masas de aire frío se desplacen hacia el sur. En ese caso, ¿no deberían también producirse corrientes de aire cálido hacia el norte? Y, de ser así, ¿no constituiría ese fenómeno otro mecanismo de retroalimentación positiva que aceleraría el calentamiento del Ártico?

Ben Harding
Boulder, Colorado

Responde Greene: *La corriente en chorro presenta ondulaciones cuya amplitud tiende a aumentar durante las fases negativas de la AO y la NAO. Cuando una parte de esas ondas se dirige hacia el sur y transporta aire ártico a latitudes más bajas, otra parte penetra hacia el norte y arrastra aire cálido a latitudes superiores. En general, ese aire cálido no alcanzará latitudes lo bastante altas como para influir directamente en la fusión de la banquisa ártica ni en la retroalimentación asociada al albedo del hielo oceánico. Sin embargo, existen otros procesos relacionados con una corriente en chorro más ondulada que sí podrían amplificar el calentamiento en el Ártico. En concreto, el transporte de vapor de agua hacia latitudes altas puede provocar los siguientes efectos:*

1. Dado que el vapor de agua ejerce un potente efecto invernadero, absorbe las emisiones de radiación infrarroja (calor) y provoca un calentamiento adicional de la atmósfera.

2. El vapor de agua puede condensar en nubes que retienen el calor, lo cual también incrementaría las temperaturas.

3. Por último, esa condensación da lugar a una liberación de calor latente. Ello también contribuye a calentar la atmósfera.

Además de los efectos señalados, la ondulación de la corriente en chorro se asocia al desarrollo de fenómenos de bloqueo: la formación de sistemas estacionarios de altas presiones que entorpecen la circulación atmosférica. En algunos veranos de los últimos años, el aumento del bloqueo sobre Groenlandia ha alterado la circulación de los vientos y ha favorecido la migración de hielo desde el océano Ártico hacia el Atlántico Norte. Esa pérdida de hielo ártico ejerce un efecto de retroalimentación por albedo similar al que provoca la fusión de la banquisa.

Hay, pues, razones suficientes para pensar que la aparición de corrientes en chorro más onduladas podría aumentar los fenómenos de retroalimentación positiva e inducir un calentamiento del Ártico aún más rápido.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes



ASTRONOMÍA

Prever el próximo Cheliábinsk

Durante los próximos años, la NASA reunirá grandes cantidades de datos sobre los objetos próximos a la Tierra (más conocidos por sus siglas inglesas, NEO), incluidos cometas y asteroides. Por desgracia, no parece fácil protegerse de un meteoroide como el que el pasado febrero sobrevoló la ciudad rusa de Cheliábinsk, en la que dejó más de un millar de heridos. Con sus 17 metros, aquel objeto era demasiado pequeño para haber sido detectado en un rastreo sistemático. Los buscadores de NEO suelen centrarse en objetos de mayor tamaño y potencialmente más peligrosos. Con todo, dado que los sucesos similares al de Cheliábinsk ocurren de media una vez al siglo, puede que para cuando caiga el próximo la humanidad ya cuente con técnicas más eficaces.

Desde hace unos diez años, el Sondeo Celeste Catalina constituye el principal proyecto dedicado a buscar objetos que transitan demasiado cerca de nuestro planeta. Gracias a un conjunto de tres telescopios que operan desde Arizona y Australia, esta iniciativa viene descubriendo unos 600 cuerpos celestes al año. Sus resultados han ayudado a la NASA a alcanzar el objetivo de catalogar el 90 por ciento de todos los objetos próximos de más de un kilómetro de diámetro.

El primero de los cuatro telescopios que integrarán el Sondeo Telescópico Panorámico y Sistema de Respuesta Rápida (Pan-STARRS), en Hawái, comenzó a funcionar hace poco. En términos del número de objetos detectados al año supone ya el segundo buscador de NEO más importante. Aunque debería facilitar el rastreo de asteroides de varios cientos de metros de diámetro, la mayoría de los objetos de menor tamaño seguirá quedando fuera de su alcance.

El Gran Telescopio para Rastreos Sinópticos (LSST), que se espera que entre en funcionamiento a finales de esta década en Chile, gozará de una capacidad de observación asombrosa. Con un diámetro de 8,4 metros y una cámara digital de tres gigapíxeles, podrá catalogar todos los cuerpos de más de 140 metros de longitud, lo que cumpliría con el próximo objetivo de la NASA.

El Sistema de Última Alerta de Impacto de Asteroides contra la Tierra (ATLAS), el cual debería entrar en servicio en 2015, se ha propuesto el objetivo de detectar objetos con la antelación suficiente para evacuar las áreas amenazadas. Sus diseñadores creen que este conjunto de telescopios situados en Hawái podrá identificar un asteroide de cincuenta metros de diámetro (con capacidad para arrasar una ciudad entera) una semana antes de su posible colisión contra nuestro planeta.

La Fundación B612, una institución sin ánimo de lucro, manifestó hace poco su propósito de construir Sentinel, un telescopio espacial que escudriñaría el sistema solar interior desde una órbita similar a la de Venus. Se lanzaría en 2018 y se centraría de inmediato en los asteroides más peligrosos. En un plazo previsto de cinco años y medio, identificaría el 90 por ciento de los objetos próximos a nuestro planeta cuyo radio sobrepasase los 140 metros.

—John Matson



Daños causados por el bólido de Cheliábinsk el pasado mes de febrero.

TECNOLOGÍA

Hablar con gestos

Hace ya tiempo que Stephen Hawking depende de los avances técnicos para comunicarse. Durante la última década, el conocido físico, que lleva medio siglo luchando contra una enfermedad neurodegenerativa, se ha valido de una contracción voluntaria en una de sus mejillas para componer, letra a letra, palabras y frases. Con cada movimiento detenía un cursor que se desplazaba sin cesar sobre las letras en una pantalla. En los últimos años, sin embargo, su estado se ha deteriorado. Ahora solo puede comunicarse al ritmo de una palabra por minuto. A finales de 2011, Hawking se puso en contacto con Intel y solicitó ayuda.

El director técnico de la compañía, Justin Rattner, informó en la Feria Internacional de Electrónica de Consumo, celebrada el pasado mes de enero, de que habían construido un sistema mejorado de predicción de palabras. En estos momentos la multinacional está explorando el uso de programas informáticos de reconocimiento facial para mejorar la comunicación. El trabajo forma parte de un programa de investigación más amplio que persigue desarrollar dispositivos de ayuda para ancianos y discapacitados. La clave reside en la «percepción del contexto», una técnica que permite que un instrumento se anticipe a las necesidades del usuario; por ejemplo, recordándole que tiene una cita o avisándole de que debe coger dinero antes de salir a realizar un recado.

Materializar la idea de Intel requiere toda una combinación de sensores (cámara, acelerómetro, micrófono y termómetro, entre otros), así como un programa informático capaz de revisar la agenda del usuario, sus redes sociales o sus hábitos de navegación en Internet. «En pocos años estaremos conectados emocionalmente a nuestros dispositivos», predice Rattner.

—Larry Greenemeier

GETTY IMAGES (*Cheliábinsk*); DIMITRIOS KAMBOURIS, GETTY IMAGES (*Hawking*)

CONSERVACIÓN

Rastreo de atunes mediante el cesio de Fukushima

Un equipo de investigadores ha hallado trazas de isótopos radiactivos procedentes del accidente nuclear de Fukushima en atunes rojos cercanos a las costas de California. Aunque parecen malas noticias, los niveles de radiación resultan demasiado bajos para dañar a humanos o peces. Sin embargo, sí podrían ayudar a los conservacionistas a rastrear las especies amenazadas por la sobreexplotación y diseñar programas para protegerlas.

La pasada primavera, Dan Madigan, estudiante de doctorado de la Universidad Stanford, y otros colaboradores hallaron trazas de cesio 137 y cesio 134 en atunes rojos pescados en las proximidades de San Diego. Lo más probable era que los peces hubiesen incorporado dichos isótopos a su organismo tras ingerir plancton o peces contaminados cerca de la costa japonesa. Los científicos diseñaron un método para estudiar las migraciones del atún a partir de la cantidad almacenada de isótopos radiactivos. El cesio 134 tiene un período de semidesintegración de 2,1 años; el cesio 137, de 30,1 años. Así pues, verificaron si la proporción de cada isótopo presente en los peces reflejaba el momento de su llegada a las costas californianas. En general, una mayor abundancia del primero indicaría un tiempo de llegada más reciente.

Los resultados se mostraron conformes con lo que los expertos ya sabían acerca de la especie. Los atunes rojos del Pacífico desovan cerca de las costas de Japón. Las crías pasan allí su primer año de vida y, después, o bien permanecen en la zona, o bien se dirigen hacia la costa californiana para engordar antes de aparearse. El equipo de Madigan halló que todos los peces con una edad igual o inferior a 1,6 años habían migrado y que el viaje desde Japón les habría llevado unos dos meses. Estos datos les permitieron validar su método. Los resultados aparecieron publicados el pasado mes de marzo en la revista *Environmental Science & Technology*.

La nueva técnica se muestra prometedora para rastrear los patrones migratorios de otras especies del Pacífico, como tiburones, ballenas y tortugas. Aunque los niveles de cesio 134 pronto serán demasiado bajos para resultar útiles, el equipo de Madigan logró correlacionar las tasas de radiactividad con la abundancia de otros isótopos estables, como los de carbono y nitrógeno. Ello permitirá emplearlos a modo de indicadores. «Uno de los métodos es finito, pero el otro no. Una vez que hemos establecido una relación entre ambos, podremos usar el segundo en el futuro», explica Madigan.

—Marissa Fessenden



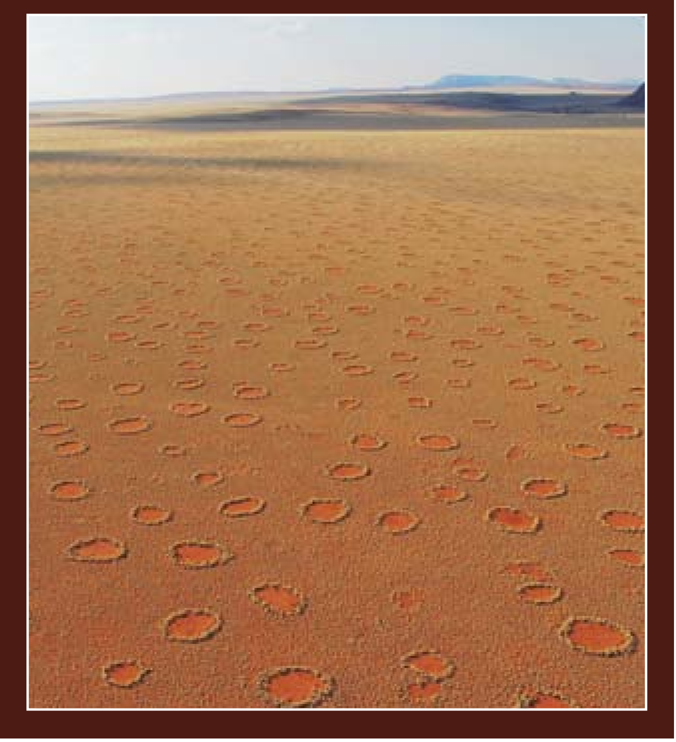
¿QUÉ ES ESTO?

Círculos enigmáticos: En el desierto del Namib, en la zona sudoccidental de África, la vegetación no destaca por su abundancia. Sin embargo, en algunas áreas aparecen misteriosos anillos de hierba con el centro yermo, los cuales prosperan a pesar de la escasez de lluvia. Un estudio reciente acaba de esclarecer su origen. Estos «anillos de hadas», como se les suele llamar, serían una consecuencia de la labor de ciertas criaturas diminutas: las termitas.

En el interior y las inmediaciones de tales anillos, cuyo diámetro varía entre uno y cincuenta metros, y cuya presencia puede prolongarse durante décadas, suelen congregarse una gran cantidad de organismos. En un estudio publicado el pasado mes de marzo en la revista *Science*, sin embargo, los autores refirieron que solo una especie era común a todos ellos: la termita del desierto *Psammotermes allocerus*. El pequeño insecto se convertía así en el principal candidato para explicar el fenómeno.

¿Cómo se crean los anillos de hadas? Cuando las termitas se agrupan para alimentarse, destruyen la vegetación y dejan vacía una zona de geometría circular que retiene más agua que el terreno circundante. Dichos círculos actúan así como depósito de agua para las termitas, las plantas que crecen en sus bordes y otros organismos sedientos.

—Sophie Bushwick



RICHARD HERRMANN *Getty Images (atún)*; CORTESÍA DE NORBERT JUERGENS *Universidad de Hamburgo (Namib)*

MEDICINA

Medieval y moderno

En tiempos antiguos, antes de que se descubrieran los antibióticos, los médicos empleaban larvas de insectos para ayudar a limpiar heridas y evitar infecciones. Debido a que las larvas solo se alimentan de la carne muerta, los facultativos no tenían que preocuparse por la posibilidad de que devorasen los tejidos sanos. La llegada de los antibióticos convirtió a los gusanos medicinales en una reliquia del pasado.

La resistencia cada vez mayor a los antibióticos, sin embargo, ha reavivado el interés por las larvas y, en 2004, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. los aprobó como «dispositivo médico». En la actualidad, los proveedores de larvas las crían a partir de huevos de mosca esterilizados y las colocan en paquetes semejantes a una bolsita de té, que los médicos aplican directamente a las heridas (con lo que evitan que las larvas se escapen y terminen por convertirse en moscas adultas). Mientras va aumentando la aplicación de los insectos para tratar heridas, se ha ido descubriendo el doble proceso mediante el cual los gusanos llevan a cabo su milagro.

Un estudio publicado el año pasado en *Archives of Dermatology* demostró que las larvas colocadas en incisiones quirúrgicas ayudaban a eliminar más tejido muerto que el desbridamiento quirúrgico, la estrategia estándar actual que consiste en el uso de un escalpelo o de tijeras. «El desbridamiento con gusanos elimina todo el tejido muerto e infectado, una condición necesaria para la cicatrización de la herida», afirma Anne Dompmartin-Blanchère, dermatóloga de la Universidad de Caen y autora principal del estudio. El desbridamiento quirúrgico suele ser un proceso prolongado y doloroso, mientras que el tratamiento con gusanos resulta más breve y no produce dolor, añade.

Otro estudio, publicado a finales del año pasado en *Wound Regeneration and Repair* por Gwendolyn Cazander, del Centro Médico de la Universidad de Leiden, y sus colaboradores, reveló que las secreciones de las larvas modulaban la respuesta del sistema del complemento, una parte del sistema inmunitario que reacciona contra los patógenos invasores y que resulta crucial para acabar con las infecciones. Cierta activación del complemento es necesaria, pero una reacción excesiva podría producir una inflamación crónica, lo que mantendría la herida abierta y vulnerable



a las infecciones. Las secreciones de los gusanos redujeron la actividad del complemento en muestras de sangre de adultos sanos e inhibieron la producción de varias proteínas importantes del complemento. Según se descubrió en el estudio, la atenuación de la respuesta inmunitaria promovía la cicatrización. «Entre el 50 y el 80 por ciento de las heridas que vemos pueden sanarse con gusanos», concluye Cazander.

El tratamiento con larvas puede sonar medieval, pero la medicina moderna parece mostrar que funciona.

—*Carrie Arnold*

SALUD

Atención médica a través de móviles

La posibilidad de utilizar mensajes de texto, vídeos o aplicaciones de teléfonos inteligentes para mejorar los cuidados sanitarios ha atraído una enorme cantidad de atención y financiación. Pero la «salud con móvil» sigue estando en pañales, y dos nuevos análisis ofrecen resultados poco alentadores. De 75 ensayos comparativos en los que los pacientes utilizaron la telefonía móvil para tratar una enfermedad o adoptar comportamientos más saludables, solo tres mostraron indicios fiables de éxito, según un artículo de revisión publicado en enero en *PLOS Medicine*.

En otra revisión, los mismos autores examinaron el uso de la telefonía móvil para mejorar la comunicación en la asistencia sanitaria, como el envío de mensajes de texto para recordar las citas a los pacientes; solo 11 de 42 ensayos tuvieron resultados positivos.

Rahul Chakrabarti, médico de la Universidad de Melbourne y codirector de la revista *Journal of Mobile Technology in Medicine*, considera que estas revisiones constituyen hasta el momento el metanálisis de datos más completo sobre la atención médica con móvil.

Las limitaciones de este sistema no deberían desanimar a los investigadores, afirma Caroline Free, epidemióloga de la Escuela de Higiene y Medicina Tropical de Londres, que dirigió el análisis. Es posible aprender de las experiencias que funcionaron bien. Por ejemplo, la recepción de mensajes de texto ayudó a los fumadores a dejar de fumar en un ensayo que verificó sus resultados con pruebas bioquímicas. En el único ensayo con pacientes realizado con éxito en un país en vías de desarrollo, Kenia, los mensajes de texto para recordar la toma de antirretrovíricos ayudaron a reducir los recuentos del VIH.

El problema reside en que la mayoría de los ensayos presentaban un diseño defectuoso y muchos no asignaron los participantes a los grupos de referencia y experimental de forma aleatoria. Otros se basaron en la información sobre los resultados que daban los propios pacientes, a pesar de que esta táctica ofrece datos poco fiables. Por otra parte, la mayoría de los ensayos prescindió de los países en vías de desarrollo, donde los teléfonos móviles muestran un mayor potencial para mejorar el acceso a los cuidados sanitarios.

Chakrabarti, que no participó en la investigación, afirma que los estudios ponen de manifiesto la necesidad de mejorar la metodología.

—*Lucas Laursen*

PHILIPPE PSAILA, SCIENCE SOURCE (*larvas*); ISTOCKPHOTO (*móvil*)

ENTOMOLOGÍA

Zumbidos reveladores

Para el oído humano, el zumbido de las abejas puede parecer siempre igual. Sin embargo, un grupo de expertos espera que la descodificación de pequeñas variaciones en el ruido ayude a detener el catastrófico declive de la población mundial de abejas.

Los investigadores, dirigidos por un equipo de la Universidad Trent de Nottingham, creen que los sonidos cambiantes de una colmena indican modificaciones en el estado de salud de las abejas y que los dispositivos de escucha de alta tecnología podrían proporcionar señales de alerta temprana a los apicultores. Con la ayuda de una subvención de 1,4 millones de euros de la Unión Europea, los científicos analizarán el zumbido de 20 colmenas situadas en un pueblo del sudeste rural de Francia, en un experimento de cinco años de duración que comenzó esta primavera.

El jefe del equipo, Martin Bencsik, ya ha utilizado en otras ocasiones unos sensores conocidos como acelerómetros para captar un cambio distintivo en los sonidos de las abejas antes de la formación de un enjambre, el momento en que la reina deja la colmena llevándose consigo a numerosas obreras. Esta vez, el desafío consiste en identificar variaciones en el zumbido que puedan relacionarse con una enfermedad, incluido el síndrome del despoblamiento de las colonias, un misterioso mal que ha debilitado las colmenas de todo el mundo.

La herramienta clave empleada son sensores industriales diseñados para detectar cambios sutiles en los patrones de vibración. Unos acelerómetros miniaturizados, integrados en las paredes de la colmena, medirán las vibraciones de los panales causadas por la actividad de las abejas y los sonidos que producen. Como las abejas carecen de oídos, se cree que utilizan las vibraciones, recibidas a través de las patas, para comunicarse unas con otras.

Después, el equipo de Nottingham analizará con un programa informático los datos de las colmenas para hallar relaciones reveladoras entre el zumbido (su tono o el intervalo entre pulsos) y la salud de las abejas. Bencsik prevé que, en el futuro, cualquier alteración preocupante detectada por el acelerómetro activará una alerta inalámbrica automática para el apicultor, el cual podrá tomar medidas de inmediato.

El problema reside en que los científicos aún no han logrado identificar, ni mucho menos tratar, las causas principales del declive de las abejas, que algunos estudios han atribuido a los plaguicidas. «Se han sugerido numerosos tratamientos, pero no hay pruebas de que ninguno de ellos funcione», afirma Simon Potts, profesor de biodiversidad y servicios ecosistémicos en la Universidad de Reading. Los apicultores solo pueden esperar que, cuando las herramientas de diagnóstico de Bencsik se perfeccionen, se hayan descubierto ya tratamientos más eficaces.

—William Underhill



HEIDI & HANS-JÜRGEN KOCH *Minden Pictures* (*abeja*); MUSEO DE LA NATURALEZA Y EL HOMBRE (*epidemias*); A. FUJII, TELESCOPIO ESPACIAL HUBBLE (*galaxia*), ESA Y ATG MEDIALAB (*Gaia*)

AGENDA

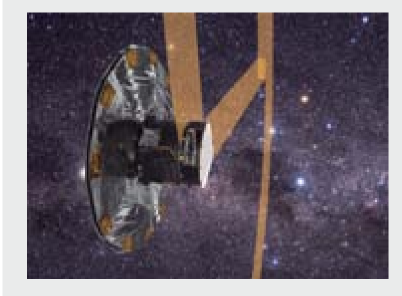
EXPOSICIONES

La Peste. El Cuarto Jinete. Epidemias históricas y su repercusión en Tenerife
Museo de la Naturaleza y el Hombre
Santa Cruz de Tenerife
www.museosdetenerife.org



Nutrición, impulso vital
Alimentación, nutrición y hábitos de vida saludables en un entorno medioambiental sostenible
Parque de las Ciencias
Granada
www.parqueciencias.com

Hasta el 15 de septiembre
Mil millones de ojos para mil millones de estrellas
Centro de Observación del Universo
Parque Astronómico del Montsec
Ager (Lérida)
www.am.ub.edu/expogaia



Libros inmortales, instrumentos esenciales
Museo Nacional de Ciencia y Tecnología
Madrid
www.muncyt.es

Darwin y Galileo a través del cómic
Instituto de Historia de la Medicina y de la Ciencia López Piñero
Valencia
www.ihmc.uv-csic.es

La belleza: una búsqueda sin fin
Museo de la Evolución Humana
Burgos
www.museoevolucionhumana.com

BIOLOGÍA

Epigenética, temperatura y sexo

Las condiciones térmicas que experimentan algunos animales durante el desarrollo temprano determinan su sexo. El «recuerdo» de la temperatura se transmite por mecanismos epigenéticos

En biología es bien conocido que el ambiente modula la expresión del genotipo para dar lugar al fenotipo. Sin embargo, el modo en que el entorno determina un fenotipo tan crucial como el sexual ha sido desde siempre motivo de especulaciones, como la del filósofo Empédocles (483-424 a.C.), quien propuso que el sexo de los recién nacidos venía definido por la temperatura del útero materno. En un estudio publicado en 2011 en *PLoS Genetics*, nuestro grupo ha esclarecido el mecanismo mediante el cual la temperatura influye en la determinación del sexo de un animal.

La definición de este rasgo en los mamíferos se basa en la genética cromosómica. Esto es, el sexo de un individuo depende de sus cromosomas sexuales, que se designan por XX en las hembras y XY en los machos. El desarrollo del feto tiene lugar en el interior de la madre, donde se halla protegido de los cambios ambientales que se producen en el medio externo.

Sin embargo, en otros vertebrados, como los reptiles y los peces, la determinación del sexo puede ser genética o ambiental. En los peces, la genética resulta la más habitual y presenta distintas modalidades: la cromosómica, similar a la de los mamíferos, y la poligénica, en cuyo caso el sexo viene definido por la combinación de factores masculinos y femeninos dispersos en los autosomas (los cromosomas no sexuales).

Por otro lado, en la determinación ambiental, los valores de un factor externo durante el desarrollo temprano definen el sexo de los individuos. El factor más conocido corresponde a la temperatura, que controla el fenotipo sexual de algunos peces y numerosos reptiles, entre ellos ciertos lagartos, muchas tortugas terrestres, las tortugas acuáticas y los cocodrilos.



El recuerdo de la temperatura

En la lubina (*Dicentrarchus labrax*) la determinación del sexo es a la vez poligénica y sensible a la temperatura. En nuestro grupo de investigación nos llamó la atención la enorme influencia de este factor ambiental durante el primer mes de vida del pez. En este período las gónadas de la lubina no solo no llegan a diferenciarse, sino que ni siquiera se han formado en su expresión más rudimentaria. ¿Cómo es posible, entonces, que la temperatura afecte el destino de un órgano que aún no existe? En otras palabras, ¿dónde reside la «memoria» de la temperatura experimentada en las fases críticas, cuando se decide el sexo? La búsqueda de respuesta a estas preguntas nos hizo pensar en la presencia de un mecanismo epigenético.

Existen varios mecanismos epigenéticos bien conocidos. Uno de los más importantes consiste en la metilación del ADN, que tiene lugar cuando un grupo metilo se añade al carbono 5' de una desoxicitidina adyacente a una guanidina (ambas moléculas son nucleósidos, las unidades básicas de los ácidos nucleicos). Cuando la metilación de estos dinucleótidos, denominados CG, se localiza en regiones reguladoras, como los promotores de los genes, suele inhibir la expresión de los genes en cuestión. Las modificaciones del ADN por metilación pueden reproducirse cuando una célula





En la lubina (*Dicentrarchus labrax*)**, la determinación del sexo es poligénica pero con influencia de la temperatura durante la fase larvaria. Las superiores a 17 ºC tienen un efecto masculinizante. La tortuga escurridiza (*Trachemys scripta*) posee determinación del sexo dependiente de la temperatura. Durante la fase de incubación, los valores alrededor de 26 ºC dan lugar a machos; los de 31 ºC, a hembras. En ambas especies, las temperaturas masculinizantes inhiben la expresión del gen *cyp19a1*, que codifica la aromatasa, la enzima catalizadora de la síntesis de estrógenos.**

WIKIMEDIA COMMONS/MASSIMO LAZZARI/CC BY SA 3.0 (*Trachemys*); WIKIMEDIA COMMONS/ROBERTO PILLON/CC BY SA 3.0 (*Dicentrarchus*)

se divide, de forma que las células hijas poseen el mismo patrón de modificaciones que la célula madre. Este mecanismo se denomina epigenético porque confiere cambios heredables (de una generación celular a la siguiente) en la regulación génica. Pero, a diferencia de las mutaciones, no implican alteraciones en la secuencia nucleotídica del ADN.

Los mecanismos epigenéticos revisten una enorme importancia en la adquisición de la identidad celular, puesto que a partir de un único genoma un individuo puede poseer múltiples tipos celulares, cada uno con un perfil de expresión génica determinado. Tales modificaciones resultan, por tanto, esenciales durante el desarrollo y la organogénesis. Es más, permiten integrar las variaciones en las condiciones ambientales en cambios estables en la expresión génica. En un artículo recién publicado en *Developmental Dynamics* hemos descrito la repercusión de los mecanismos epigenéticos en la determinación del sexo.

En los estudios que hemos realizado con la lubina, hemos encontrado que una temperatura de 21 ºC, como la utilizada en numerosos criaderos de esta especie, da lugar a una mayor metilación del ADN del promotor del gen *cyp19a1* en la gónada. Este gen codifica la enzima aromatasa, catalizadora de la síntesis de estrógenos, que resultan imprescindibles para el desarrollo ovárico en todos los vertebrados no mamíferos. Por consiguiente, a una temperatura de 21 ºC se originan sobre todo machos.

Se establece así una conexión mecanicista entre una variable ambiental muy importante, como es la temperatura, y la determinación del sexo, responsable a su vez de la proporción de sexos en la descendencia, uno de los parámetros demográficos más relevantes para las poblaciones. Como retos importantes queda por averiguar si un mecanismo semejante opera también en otras especies, en particular de reptiles, y cómo las especies cuya determinación del sexo depende de la temperatura del medio externo pueden verse afectadas por un ascenso de esta en un contexto de cambio global. En este sentido, cabe mencionar un estudio recién publicado en *PLoS ONE* por Matsumoto y sus colaboradores, de la Universidad de Texas en Austin. El trabajo demuestra que *Trachemys scripta*, una tortuga con determinación del sexo dependiente de la temperatura, posee un mecanismo epigenético similar, lo que confirma nuestras observaciones.

—Francesc Piferrer
Instituto de Ciencias del Mar, CSIC
Barcelona

SALUD PÚBLICA

Los costes sociales del estrés

Relaciones entre el acortamiento de los telómeros, el estrés crónico y las enfermedades

En la película *Vacaciones*, estrenada en 2006, la actriz Cameron Díaz, que interpreta a una mujer cuya vida está dando tumbos sin control, exclama: «El estrés agudo... hace encoger el ADN de nuestras células hasta que pierde la capacidad de replicarse. Por eso, cuando estamos estresados tenemos un aspecto demacrado».

Desde un punto de vista científico, Hollywood dio en el clavo. El ADN al que se refiere el personaje de Díaz es el segmento que constituye los telómeros, unas estructuras que rematan y protegen los extremos de los cromosomas. Se estaba refiriendo a nuestro artículo de 2004 publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, el primero en vincular el estrés psicológico crónico con un mantenimiento defectuoso de los telómeros.

A partir de la publicación de ese artículo, se ha observado de forma generalizada que diversos tipos de estrés crónico se asocian al acortamiento de los telómeros, y probablemente lo provoquen. Por otra parte, los telómeros reducidos y el estrés se han relacionado, de manera independiente, con algunas dolencias frecuentes, como la diabetes y las enfermedades cardiovasculares.

Esas relaciones resultan tan habituales que, incluso sin un conocimiento detallado de las rutas bioquímicas implicadas, el mensaje es claro. El fracaso a la hora de paliar el estrés agudo causado por amenazas prolongadas como la guerra, problemas financieros, abusos y maltrato psicológico (especialmente en los niños) conllevará unos costes muy superiores en el futuro: personales, económicos y de otro tipo.

Desgaste genético

Los telómeros humanos constan de varias kilobases de secuencias de ADN repetidas a las que se unen unas proteínas protectoras especializadas. Una peculiaridad del mecanismo de replicación del ADN hace que los telómeros se acorten a medida que las células se dividen. A veces la enzima telomerasa repone el ADN perdido, pero, a medida que envejecemos, nuestros telómeros se van haciendo más pequeños. Si se reducen demasiado, ya sea por la edad o por un mantenimiento defectuoso, las células pueden dejar de dividirse. También pueden empezar a funcionar de forma incorrecta; por ejemplo, segregan factores que provocan la inflamación o desencadenan el desarrollo de tumores.

En 2004, comparamos la longitud de los telómeros en glóbulos blancos de madres de hijos con enfermedades crónicas y la de madres con hijos sanos. Cuanto más tiempo la madre había sido la principal cuidadora de su hijo enfermo (las enfermedades de los niños iban desde trastornos intestinales hasta el autismo), mayor desgaste presentaban sus telómeros. Además, cuanto más estrés sufrían las madres de ambos grupos (lo que se valoraba a partir de la respuesta a preguntas estandarizadas, como en qué medida creía mantener el control sobre su vida), más cortos eran sus telómeros. El mayor acortamiento en las madres «más estresadas», en comparación con el de las «menos estresadas», equivalía al causado, como mínimo, por una década de envejecimiento.

Esa relación entre el estrés y la longitud de los telómeros se ha observado en otros casos, desde estudios con niños de corta edad hasta los que incluyen adultos de 80 años; desde pequeños muestreos clínicos de menos de cien personas hasta

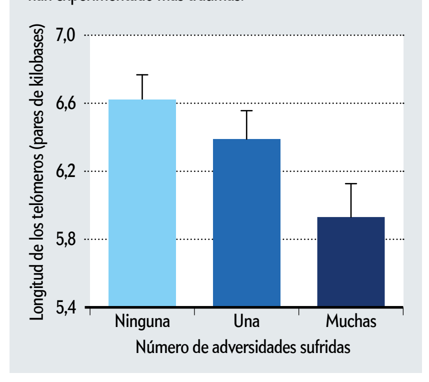
grandes estudios poblacionales basados en miles de personas.

Sometido a estrés, el organismo aumenta la producción de ciertas hormonas, como el cortisol, y otros factores bioquímicos. Estos compuestos ayudan a desarrollar una respuesta apropiada al estrés a corto plazo. Pero si su sobreproducción se prolonga durante meses o años, pueden alterar la expresión génica, probablemente con efectos deletéreos. En el laboratorio, estos factores provocan también un acortamiento de los telómeros; en concreto, el cortisol disminuye la actividad de la telomerasa. Se piensa que las rutas implicadas en las alteraciones de la expresión génica quizás interactúen con las que afectan al mantenimiento de los telómeros, aunque todavía no se ha explorado tal posibilidad.

Aunque numerosos estudios han desentrañado las relaciones entre los telómeros reducidos y el estrés, otros han establecido asociaciones entre ese defecto y algunas enfermedades frecuentes. Ciertas mutaciones raras en los genes que codifican los componentes de la telomerasa dan lugar a telómeros demasiado cortos. Ello provoca trastornos en el sistema inmunitario, como la anemia aplásica y otras dolencias, entre las que se incluyen la fibrosis pulmonar, la diabetes, algunas enfermedades cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer. Cabe destacar que muchas de esas enfermedades hereditarias, denominadas «síndromes de los telómeros», suelen asociarse con el envejecimiento.

El desgaste de los telómeros permite incluso predecir el riesgo de padecer ciertas enfermedades. Tras medir la longitud de los telómeros durante 10 años en hombres y mujeres, se ha comprobado que quienes los presentaban más cortos tenían una probabilidad tres veces mayor de sufrir determinados tipos de cáncer, como el de páncreas, que quienes los tenían más largos. En los ancianos, el riesgo de desarrollar demencia o de fallecer por cualquier causa era un 50 por ciento mayor.

Durante décadas se han venido acumulando pruebas de que el estilo de vida, el bienestar y otros factores ambientales pueden contribuir de manera significativa al estado de salud. Pero ahora hemos descrito tres combinaciones binarias que relacionan entre sí tres factores: el estrés con el acortamiento de los telómeros, el estrés con el riesgo de ciertas enfermedades y el acortamiento de los telómeros con el riesgo de esas enfermedades. Resulta difícil evitar la conclusión de que al menos una de las formas mediante las cuales el estrés causa enfermedades crónicas corresponde a la reducción de los telómeros.



FUENTE: J. K. KIELCOLT-GLASER ET AL. *PHYCHOSOM. MED.* N.º 73, PÁGS. 16-22, 2011

Es tiempo de actuar

¿Cómo deberían reaccionar los responsables políticos en vista de las numerosas pruebas que ha generado el estudio de los telómeros?

Identificar las rutas celulares y fisiológicas que sustentan la relación de unos telómeros inusualmente cortos con el estrés y las enfermedades podría resultar importante a la hora de descubrir posibles objetivos de los tratamientos. Pero los responsables políticos no deben esperar a que se desvelen todos los detalles mecanicistas (algo que podría llevar décadas), más si se tiene en cuenta que lo que se observa en el laboratorio no suele reflejar lo que está pasando en el conjunto del organismo.

Una lección sorprendente que nos enseñan los telómeros es que, a la hora de hacer frente a las enfermedades, los factores ambientales desempeñan un papel importante, además de los genéticos. Entre 2008 y 2011, los Institutos Nacionales de Salud de Estados Unidos (NIH) destinaron 29 millones de dólares a la investigación genética. En comparación, solo concedieron 14 millones de dólares a las investigaciones relacionadas con las ciencias sociales y conductuales. Y ello a pesar de que varios análisis concluyen que un 50 por ciento de la varianza de la mortalidad prematura en EE.UU. se atribuye a comportamientos que pueden modificarse, como la sobrealimentación, el alcoholismo y el tabaquismo (en parte, también relacionados con el estrés).

Con las técnicas modernas resulta más fácil identificar las variaciones génicas de las personas que la plétora de influencias ambientales, y ya no digamos los diversos modos en que se comportan, piensan y sienten. Sin embargo, para determinar la propensión de una persona a una enfermedad deberán conocerse todos estos factores. La longitud de los telómeros nos ofrece una perspectiva excepcional sobre su estado fisiológico y patológico.

La investigación de los telómeros nos ayuda a reconocer algunas formas para mejorar la salud. Los ratones transgénicos carentes de telomerasas se vuelven pronto marchitos y canosos; pero esos cambios, asociados al envejecimiento, se pueden revertir, al menos en parte, restaurando la actividad de la telomerasa. Diseñar fármacos para aumentar esa enzima en humanos sin introducir efectos secundarios indeseables constituye un reto formidable. Otras estrategias más viables para mitigar el acortamiento de los telómeros consistirían en aliviar las condiciones que producen el estrés crónico y el cambio de ciertos hábitos.

En apoyo a la última estrategia, algunos estudios piloto sugieren que, si se aplican medidas reductoras del estrés durante tan solo tres meses, a menudo combinadas con un aumento de la actividad física y con cambios dietéticos, puede ralentizarse o incluso revertirse el desgaste de los telómeros al aumentar la actividad de la telomerasa. Un reto fascinante consiste en ver si la idea de la erosión de los telómeros (que, según muchos, evoca una imagen impactante de una salud decadente) podría motivar a las personas para que modificaran su conducta.

Comenzar jóvenes

Esfuerzos individuales aparte, quizá la conclusión más clara que puede extraerse del estudio de las telomerasas es que, para evitar numerosas enfermedades frecuentes, en especial aquellas cuya prevalencia está aumentando en la población, cada vez más anciana, los Gobiernos y otros responsables políticos deberían priorizar lo que nosotras denominamos la «reducción del estrés social». Los retiros para meditar o las clases de yoga quizás ayuden a quienes puedan permitirse el tiempo y el gasto. Pero sobre todo defendemos políticas socioeconómicas amplias que amortigüen los factores que provocan estrés crónico a tantas personas.

Los resultados de los estudios sobre los telómeros, el estrés y las enfermedades refuerzan una recomendación que hizo la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2008 para reducir las desigualdades en materia de salud. La OMS propone que los Gobiernos y las organizaciones sanitarias mundiales se centren en mejorar la edu-

cación y las condiciones en las que tiene lugar el desarrollo infantil.

Varios estudios indican que el estrés empieza a erosionar los telómeros durante la infancia o incluso antes del nacimiento. Se ha demostrado así que cuanta más violencia habían sufrido los niños o cuanto más tiempo habían pasado en un orfanato, más cortos eran sus telómeros. Incluso los adultos jóvenes sanos cuyas madres habían sufrido estrés agudo durante el embarazo (por ejemplo, a causa de la muerte de un pariente cercano) presentaban los telómeros más desgastados que aquellos cuyas madres habían experimentado poco estrés.

Y no solo eso, los efectos del estrés al principio de la vida tienen su eco en la etapa adulta, según han revelado Surtees, de la Universidad de Cambridge, y sus colaboradores en un artículo publicado el 2012 en *Molecular Psychiatry*. En el estudio, en el que participaron más de 4000 mujeres de mediana edad del Reino Unido, se ha demostrado que cuantos más tipos de adversidad había padecido una mujer de niña (como abusos físicos, el divorcio de sus padres o el hecho de que se quedaran en el paro o consumieran drogas), más cortos eran sus telómeros. Ese efecto se ha observado también entre los más ancianos. Incluso el haber tenido menos años de educación escolar en la infancia guarda relación con un acortamiento de los telómeros en la edad madura o avanzada.

Retrasar hasta la edad adulta iniciativas que mitiguen enfermedades como la diabetes solo conseguirá agravar los costes personales y sociales. Un ejemplo de estrategia preventiva es la iniciativa *Strong Start* («Un buen comienzo»), del programa de salud Medicaid de Estados Unidos, que trata de incrementar los cuidados relacionados con el embarazo. Mejorar la educación y la salud de las mujeres en edad de procrear constituye una forma muy eficaz de evitar que las deficiencias en materia de salud se vayan extendiendo a las siguientes generaciones.

La importancia de la calidad de vida de las personas o la conveniencia de que las sociedades y los Gobiernos destinen más recursos a madres e hijos no resulta nada nuevo ni controvertido. La novedad reside en los numerosos datos que demuestran que los telómeros registran de forma clara los infortunios sufridos en la vida. Se hallan más desgastados en las personas expuestas a la adversidad durante la infancia, y su longitud se reduce por cada año que una persona haya estado deprimida, cuidando de un niño enfermo, sufriendo abusos, etcétera.

Desde los extremos de nuestros cromosomas, los telómeros aportan un nuevo indicio de que el estrés social y fisiológico incontrolable, sobre todo el que se produce durante la infancia, resulta tan dañino como el tabaquismo o el consumo excesivo de comida basura.

—Elizabeth H. Blackburn
Dpto. de bioquímica y biofísica
Universidad de California
en San Francisco
—Elissa S. Epel
Dpto. de psiquiatría
Universidad de California
en San Francisco

Artículo original publicado en *Nature* 490, págs. 169-171, 2012.
Traducido con el permiso

FÍSICA CUÁNTICA

Cristales temporales

Una intrigante propuesta, basada en el concepto de ruptura de simetría bajo traslaciones en el tiempo, podría abrir el camino a un nuevo campo de investigación

Filósofos, físicos y escritores han reflexionado desde siempre sobre la eterna periodicidad que llena nuestras vidas, desde el latido del corazón hasta las órbitas de los planetas. Isaac Newton y Leonardo da Vinci investigaron el movimiento perpetuo y concluyeron que se trataba de un asunto para la alquimia. Curiosamente, hoy sabemos que el movimiento perpetuo es posible. Otra cosa son las oscilaciones perpetuas.

Desde hace unos meses asistimos a un nuevo debate sobre la relación entre el tiempo y una de las nociones más importantes de la física moderna: la ruptura espontánea de simetría. Este último concepto puede entenderse tomando como ejemplo un simple copo de nieve. A medida que el agua cristaliza, su energía disminuye a lo largo de un proceso en el que la homogeneidad e isotropía de la fase líquida se desvanecen. La ruptura de simetría ocupa un lugar fundamental en el mundo en que vivimos: la orientación del cristal líquido de las pantallas de televisión o el corto alcance de las interacciones nucleares débiles dependen de ella. En tales casos, sin embargo, la ruptura de simetría deja inalterada la homogeneidad del tiempo. Pero en nuestro mundo abundan también los relojes: periodicidades y oscilaciones que rompen la simetría bajo desplazamientos temporales.

Tres artículos publicados en octubre del año pasado en *Physical Review Letters* han propuesto y explorado un concepto evocador: el de cristal temporal. Dado que un cristal ordinario se caracteriza por ser una estructura periódica en el espacio, ¿acaso no podría un sistema físico desarrollar de manera espontánea una periodicidad temporal? En la naturaleza no faltan ejemplos de sistemas físicos oscilatorios. Valgan como ejemplos el sonido en el tubo de un órgano o de cualquier tipo de reloj. Sin embargo, tales sistemas necesitan recibir un aporte energético para mantener su ritmo. Un cristal temporal, en cambio, no requeriría ninguna energía adicional. Al igual que sus primos espaciales, se formaría de manera espontánea, sin una fuerza que rija el proceso.

Corrientes perpetuas

Semejante pregunta nos lleva a considerar varios conceptos sutiles en mecánica cuántica. En física cuántica, los estados que poseen una energía bien definida reciben el nombre de estados estacionarios, ya que la tasa de cambio de cualquier propiedad observable asociada a dichos estados es cero. De manera un tanto paradójica, esto no excluye el movimiento perpetuo. Un ejemplo célebre lo hallamos en la superconductividad, un fenómeno que permite que ciertos metales soporten corrientes eléctricas perpetuas cuando son sometidos a temperaturas muy bajas. En dicho principio se basan, entre otras aplicaciones, los dispositivos de imagen por resonancia magnética.

Si, a través de un aro metálico que ha sido enfriado hasta alcanzar el estado superconductor, se hace pasar un pequeño campo magnético, en el anillo aparecerá una corriente eléctrica permanente. Sin embargo, a pesar de tratarse de una corriente perpetua, esta es también homogénea y constante, por lo que no romperá la simetría bajo traslaciones temporales.

En física, la ruptura de simetría se halla asociada al concepto de parámetro de orden. En un cristal este viene dado por la modulación periódica de su densidad. Cuando tiene lugar una ruptura de simetría, el parámetro de orden desarrolla correlaciones de alcance infinito: en el caso de un cristal, la densidad se modula de forma coherente sobre largas distancias.

En un cristal cuántico la ruptura de simetría no se manifiesta de manera inmediata en la función de onda. Ello se debe a que los nodos de la red cristalina pueden ocupar cualquier posición del espacio con idéntica probabilidad, por lo que no podremos apreciar la ruptura de simetría hasta que no midamos la posición de uno de los átomos de la red. Por un lado, la función de onda es completamente homogénea en el espacio, pues se halla descrita por una superposición de estados con la simetría rota. Sin embargo, una vez que observemos una pequeña región del cristal, la modulación en la densidad se tornará visible. La aparición de correlaciones de alcance infinito en una función de onda por lo demás homogénea recibe el complicado nombre de «orden no diagonal de largo alcance».

Cristales cuánticos y clásicos

En el primero de los tres artículos, Frank Wilczek, premio nóbel e investigador del Instituto de Tecnología de Massachusetts, introduce el concepto de cristal temporal a partir de la observación de que ciertos sistemas deberían exhibir un orden no diagonal de largo alcance en el dominio temporal. Wilczek propone un experimento mental en el que una corriente eléctrica circula por un anillo superconductor inmerso en un campo magnético. Supongamos ahora que en dicho sistema inducimos una interacción que tienda a agrupar las partículas que componen la corriente. Dichos estados localizados reciben el nombre de solitones. Si logramos formar un solitón sin echar a perder la superconductividad, la corriente eléctrica lo hará circular a lo largo del anillo de forma periódica. De esta manera, habremos obtenido un ejemplo sencillo de cristal temporal.

Si bien las propiedades microscópicas de un cristal siguen las leyes de la mecánica cuántica, su comportamiento macroscópico queda descrito por la física clásica. Un cristal temporal no debería ser una excepción a esta regla. En un segundo artículo, Wilczek y Alfred Shapere, de la Universidad de Kentucky, demuestran que la descripción clásica de un cristal temporal requiere emplear cierta «versión avanzada» de la mecánica clásica.

En una de sus formulaciones más habituales, la mecánica clásica se basa en el principio de mínima acción de Lagrange. Este dictamina que la trayectoria newtoniana de una partícula viene dada por aquella que minimiza la «acción», una cantidad física correspondiente a cierta combinación de la energía cinética y la potencial. Wilczek y Shapere demuestran que los cristales temporales son clásicamente viables, pero con una sutileza: cuando se crea un cristal temporal, su formulación en términos energéticos (o «hamiltoniana») se torna ambigua y el principio de mínima acción (o formulación lagrangiana) debe desempeñar su papel.

Si de veras existen los cristales temporales, ¿cómo detectarlos? Esa cuestión fue abordada en el último de los tres artículos por Tongcang Li, de la Universidad de California en Berkeley, y otros colaboradores, quienes propusieron fabricar un cristal temporal a partir de una trampa de iones. En un anillo, la repulsión mutua entre los iones provoca que estos se organicen en forma de cristal. Retomando la idea de Wilczek, Li y sus coautores arguyen que, si el sistema se enfría en presencia de un pequeño campo magnético, comenzará a rotar. La idea guarda relación con el concepto de supersólido, una noción que en fecha reciente ha sido objeto de tanto interés como controversia.

Tal vez el aspecto más importante de la noción de cristal temporal sea que vislumbra la ruptura de simetría bajo traslaciones temporales como un fenómeno de equilibrio, en lugar de como una respuesta de no equilibrio a la aplicación de una fuerza externa. Se trata de una idea apasionante y controvertida que, si se muestra correcta, abrirá las puertas a un campo de investigación completamente novedoso. El descubrimiento de los superconductores puso fin a la discusión sobre el movimiento perpetuo. Con los cristales temporales, un nuevo debate no ha hecho más que empezar.

—Piers Coleman
Centro de Teoría de Materiales
Universidad Rutgers, Nueva Jersey

Artículo original publicado en *Nature* 493, págs. 166-167, 2013.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2013

Periodicidades en el espacio y en el tiempo: ***a*) La función de onda Ψ de un cristal ordinario (periódico en el espacio) es homogénea. Sin embargo, si la observamos en una región determinada, detectaremos correlaciones espaciales de largo alcance asociadas a una ruptura espontánea de simetría. *b*) Un campo magnético *B* que pasa a través de un anillo superconductor inducirá en él una corriente eléctrica permanente. Pero esta será homogénea y constante, por lo que no romperá la simetría bajo traslaciones en el tiempo. *c*) Si se genera una ligera interacción atractiva entre las partículas que transportan la corriente, estas tenderán a formar agrupaciones localizadas, o solitones. En el estado superconductor, dichos solitones deberían desplazarse a lo largo del anillo. De manera análoga a lo que ocurre en *a*, ello rompería la simetría frente a desplazamientos temporales y produciría una estructura periódica en el tiempo: un cristal temporal.**

NATURE 493, 2013

MICROBIOLOGÍA

La vida bajo nuestros pies

Dos microbiólogos debaten sobre las ventajas del análisis molecular frente a los experimentos dirigidos en el estudio de las comunidades microbianas del suelo

El suelo de nuestro planeta bulle de microorganismos que regulan procesos tan diversos como la productividad de los cultivos y la retención del carbono. El análisis molecular ha facilitado en gran medida la caracterización de las comunidades microbianas, pero ¿cómo podemos conocer mejor sus funciones ecológicas? Dos microbiólogos opinan aquí sobre la forma de abordar la investigación de esas comunidaes.

Explorar la materia oscura de la Tierra

La investigación de las funciones ambientales esenciales que desempeñan los microbios se ha acelerado gracias a la aparición de las denominadas técnicas «ómicas», las cuales permiten la secuenciación rápida de ácidos nucleicos a un coste asequible, y a los avances logrados en el análisis de otras macromoléculas biológicas (proteínas y metabolitos). El estudio de la composición total de ADN (genómica), ARN (transcriptómica), proteínas (proteómica) y metabolitos (metabolómica) de múltiples organismos permite generar datos «meta-ómicos» que abarcan el conjunto de microorganismos de un hábitat. Así pues, ¿permiten las técnicas ómicas adquirir conocimientos de la ecología microbiana que no aportan los métodos tradicionales? Cabe matizar que las técnicas ómicas no constituyen ciencia en sí mismas, sino instrumentos, y que la diferencia clave entre ellas y otros métodos reside en la enorme cantidad de datos que generan y la posibilidad de que tales datos amplíen nuestro conocimiento.

La secuenciación evita la necesidad de obtener cultivos puros de microorganismos en numerosos estudios, pero también ha revelado que la mayoría de las especies detectadas eran desconocidas. Este hecho ha llevado a pensar en la vida microbiana como la «materia oscura» del planeta, por analogía con los confines desconocidos del cosmos. Las tareas de los astrofísicos y los ecólogos microbianos guardan semejanza en numerosos aspectos: ambas disciplinas manipulan enormes volúmenes de datos y trabajan con superordenadores. Pero la escasez de recursos con que cuenta la ecología microbiana para analizar los datos ha llevado a este campo a un atolladero. ¿Deben destinarse cuantiosas inversiones a la construcción de infraestructuras que analicen ingentes cantidades de datos para estudiar las comunidades microbianas terrestres, tal y como ocurre con la astrofísica?

Un argumento contra el uso de las técnicas ómicas aduce que los datos generados son meramente descriptivos. El problema de esta crítica estriba en que ignoramos lo que no sabemos, como sucede con los estudios del cosmos. Se calcula que en el universo existen 10^{24} estrellas y que nuestro planeta alberga 10^{30} bacterias. En mi opinión, el descubrimiento de un microorganismo con funciones novedosas despierta tanto interés como el de una estrella. Suele suceder que, hasta que no indagamos en profundidad y empleamos las mejores herramientas a nuestra disposición para explorar un hábitat, ni siquiera sabemos qué cuestiones plantear o si estamos formulando las preguntas correctas.

Numerosos ejemplos ilustran cómo el estudio de las muestras microbianas

IDEAS BÁSICAS

- La actividad de las poblaciones mixtas de microorganismos que habitan en el suelo resultan fundamentales para los procesos ecológicos.
- Estas comunidades constituyen también importantes indicadores de la respuesta ante un cambio en las condiciones imperantes.
- La secuenciación rápida del ADN y otras técnicas de análisis molecular suministran ingentes cantidades de datos sobre el conjunto de genomas de una comunidad microbiana. Tales métodos pueden revelar especies o actividades microbianas desconocidas.
- Pese a lo dicho, los experimentos que contrastan hipótesis relativas a las asociaciones entre los microorganismos y el ambiente permiten una identificación y análisis más directos de esos procesos.

de diferentes ambientes con las técnicas ómicas puede propiciar nuevos descubrimientos. Antes de que en 2004 J. C. Venter y sus colaboradores publicaran en *Science* la secuenciación metagenómica del mar de los Sargazos, no se sabía que en los océanos predominaran las bacterias con un sistema fotosintético desconocido, la proteorrodopsina. La metagenómica también permitió el descubrimiento de las arqueobacterias oxidadoras de amoníaco, cuya actividad se ha constatado en diferentes hábitats desde entonces. Asimismo, la combinación de los estudios de metagenómica con los de metatranscriptómica o metaproteómica puede desvelar el tipo de funciones microbianas que se manifiestan en ciertas condiciones. Gracias a esta estrategia, en las aguas profundas del golfo de México se descubrieron las bacterias degradadoras de alcanos, del orden Oceanospirillales, a raíz del vertido de la plataforma petrolífera Deepwater Horizon en 2010.

Otra promesa de las técnicas ómicas es que los propios datos generarán hipótesis. El Proyecto Microbioma de la Tierra, que ambiciona clasificar las identidades y las funciones de las comunidades microbianas de todo el planeta, constituye un buen ejemplo de ello. Una de las hipótesis básicas del proyecto afirma que ciertas condiciones ambientales se asocian a ciertas combinaciones de especies microbianas, y que el conocimiento de tales circunstancias permitirá hacer predicciones. Así, los estudios sobre la variabilidad temporal de la microbiota del canal de la Mancha, combinados con datos ambientales, indujeron a pensar que esa información serviría para pronosticar los cambios estacionales de ciertos microorganismos y sus productos metabólicos, proposición que se ha demostrado cierta.

En los hábitats con una elevada diversidad microbiana, como el suelo, la caracterización de metagenomas sigue planteando dificultades, pero la estrategia promete aportar una visión más exhaustiva de la composición y función de las comunidades microbianas que la adquirida hasta la fecha. Un ejemplo reciente consiste en el uso de la metagenómica para identificar las comunidades del permafrost más perjudicadas por el rápido deshielo, según publicaron R. Mackelprang y sus colaboradores en *Nature* en 2011. Del suelo congelado se obtuvo el borrador del genoma de una nueva bacteria metanógena. Ello hizo plantear la hipótesis de que esa especie desempeñaría un papel importante en la producción de metano al derretirse el permafrost, lo que dio pie a nuevos experimentos para verificar la hipótesis. A medida que las técnicas se refinen y se validen, estas nos llevarán sin duda al descubrimiento de nuevas especies y metabolismos microbianos en nuestro planeta.

—Janet K. Jansson
División Ciencias de la Tierra
Laboratorio Nacional Lawrence
Berkeley, California



Minería de datos: Los abundantes microorganismos del suelo proporcionan incontables servicios a los ecosistemas terrestres, muchos de ellos apenas conocidos. Los ecólogos debaten la mejor forma de descubrir y estudiar tales procesos.

Pensar antes de secuenciar

La descripción de las comunidades microbianas del suelo se ha visto transformada por la secuenciación y, cada vez más, por las técnicas ómicas. No podemos sino maravillarnos por los avances técnicos que han hecho posible este logro. Pero ello no se ha traducido en un mayor conocimiento de esas comunidades, o de los vínculos entre la composición y la diversidad de estas y su función en el ecosistema. En mi opinión, uno de los posibles motivos es un énfasis excesivo en los enfoques descriptivos de la ecología microbiana del suelo en detrimento de los experimentos basados en hipótesis.

Los debates acerca del valor relativo de las estrategias fundamentadas en la minería de datos (el análisis masivo de datos), en comparación con la ciencia basada en hipótesis, no resultan nuevos. Estos suelen llevar a la conclusión de que ambas metodologías son complementarias y no mutuamente excluyentes, como apuntaron A. Casadevall y F. C. Fang en *Infection and Immunity* en 2008. Las hipótesis se elaboran para explicar los fenómenos observados y pueden ser influidas por el conocimiento existente, una situación aceptada por el propio filósofo Karl Popper, quien escribió: «Algunos científicos declaran, o eso parece, que sus mejores ideas se gestan mientras fuman; otros cuando beben un café o un whisky. Por eso no tengo motivos para rechazar que algunos desarrollen sus ideas por medio de una observación o de varias observaciones repetidas».

Sin embargo, las hipótesis carecen de valor si están basadas únicamente en observaciones o se refieren solo a los datos utilizados para elaborarlas. Sí revisten interés cuando aportan ideas novedosas y brotes de inspiración; proponen

explicaciones y mecanismos (universales, siempre que sea posible); y generan predicciones que pueden verificarse con experimentos. Es este proceso, y no las observaciones iniciales, el que realmente ensancha el conocimiento. La investigación basada en hipótesis ofrece marcos conceptuales y predicciones que van en contra de la observación y no son intuitivos. También indica las técnicas que se necesitan, y las que no, para comprobarlos.

La descripción de las comunidades microbianas que brindan las técnicas ómicas no son por tanto análogas a los intentos de determinar la naturaleza de la materia oscura del universo, la cual fue descubierta y sigue investigándose mediante estudios basados en hipótesis. En la práctica, el análisis puramente descriptivo de las comunidades microbianas resulta poco habitual. La mayoría de los estudios genómicos comparan las secuencias presentes en suelos distintos o tratados de diferente forma, y suelen ir acompañados de la descripción de las propiedades edáficas y de la correlación entre las secuencias y dichas propiedades. Tales análisis carecen de utilidad si con ellos no se elaboran hipótesis. Pero en general están motivados por una pregunta, aunque a menudo se formule con vaguedad o no se enuncie. Es decir, por mucho que uno no sea consciente de ello, se basan en hipótesis; por ejemplo, que las secuencias de genes proporcionan información útil sobre la identidad y la función de los microorganismos, o que las propiedades del suelo influyen en la organización y la actividad de las comunidades microbianas residentes.

La capacidad de los estudios descriptivos para ampliar el conocimiento se halla limitada por las técnicas utilizadas, que pueden ser o no relevantes para los mecanismos subyacentes. Además, la naturaleza implícita de las ideas que sustentan estos estudios puede entorpecer los intentos de explicar los hallazgos; así sucede cuando los supuestos se generan retrospectivamente o el diseño experimental resulta inadecuado. Cabe destacar también que los datos empleados para elaborar una hipótesis no pueden utilizarse para verificarla o evaluar su validez. Por tanto, una hipótesis generada por un estudio descriptivo carece de valor y no mejora el conocimiento, a menos que después sea sometida a escrutinio con experimentos.

Por desgracia, el análisis experimental suscita menor interés que la secuenciación descriptiva, aunque la razón de ser de las técnicas ómicas es su mayor capacidad explicativa. Ello podría deberse en parte al menor coste de la secuenciación. Generar gran cantidad de datos de secuencias no es caro y resulta relativamente sencillo. Reviste menos dificultad describir y comparar datos que elaborar y demostrar hipótesis.

Por supuesto, en ecología microbiana existen ejemplos de investigaciones basadas en hipótesis y realizadas con técnicas ómicas. Tampoco escasean las preguntas, ideas, conceptos y teorías ecológicas que dichas técnicas pueden abordar, contrastar y ampliar. De hecho, la enorme complejidad y heterogeneidad del suelo exige valor y esfuerzo intelectual para elaborar y enunciar de manera explícita las hipótesis, así como para comprobar empíricamente, de forma crítica y específica, las predicciones. Creo que este enfoque representa una manera más eficiente de utilizar los recursos limitados que la incesante catalogación y correlación de las secuencias obtenidas de un número cada vez mayor de suelos. Aunque entraña mayor dificultad y exige una reflexión más profunda, al mismo tiempo resulta más agradable y gratificante.

—James I. Prosser
Instituto de Ciencias Biológicas y Ambientales
Universidad de Aberdeen

Artículo original publicado en *Nature* 494, págs. 40-41, 2013.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2013


El futuro de la fabricación
INFORME ESPECIAL



JUSTIN METZ

Fabricar algo es aplicar orden con inteligencia.

Dado que el orden que observamos en la naturaleza no nos satisface, debemos modificarlo. Para ello, necesitamos información sobre el aspecto de ese nuevo orden, conocimientos para construirlo y energía para llevar a cabo el proceso. Las grandes revoluciones técnicas del pasado se han centrado en el factor energético. A modo de ejemplo, valga mencionar las centrales hidroeléctricas, la máquina de vapor o los motores eléctricos y de combustión interna.

Pero el profundo cambio tecnológico que se está gestando en nuestros días no se basa en la energía, sino en la información. Todos los materiales que componen un Boeing 747 o un iPhone son relativamente comunes, con un coste que apenas excede unos pocos dólares el kilogramo. El producto final, sin embargo, se vende a un precio de miles de dólares por kilogramo. La mayor parte de ese valor añadido procede de la información. Hoy es dicho sector el que está creando nuevas profesiones.

En su discurso sobre el estado de la Unión de este año, Barack Obama habló de «devolver puestos de trabajo» a los EE.UU.; una frase que parecía reclamar el regreso a un pasado mejor. Pero los puestos de trabajo no «vuelven»: evolucionan. Hoy por hoy, el mayor crecimiento en manufactura está teniendo lugar en China, India y otros países emergentes, lo que está contribuyendo a su desarrollo económico. Pero la maquinaria, los materiales y el conocimiento deben provenir de algún sitio. En este contexto, la oportunidad para los países avanzados reside en construir utensilios de alta tecnología que permitan la fabricación de nuevas herramientas, así como en proporcionar los programas, la financiación, la logística y la mercadotecnia necesarios para manipular las materias primas del modo más inteligente posible. Ello permitirá que la fabricación continúe almacenando cada vez más información y conocimientos con menos materiales y con un menor coste energético, contribuyendo así a ordenar el mundo de acuerdo a nuestras necesidades.

—Ricardo Hausmann

Ricardo Hausmann *es director del Centro de Desarrollo Internacional y profesor de prácticas de desarrollo económico en Harvard.*


baxter
rethink robotics

Mi jefe el robot

En el futuro, robots y seres humanos trabajarán codo con codo. Adivine quién dará las órdenes

David Bourne

Cuando Michael Dawson-Haggerty irrumpió en mi despacho ataviado con su chaqueta de soldadura verde lima ennegrecida y con una gran sonrisa, enseguida supe que lo habían conseguido. Él y su compañero se habían propuesto soldar el armazón de un Humvee (un vehículo militar muy usado en Irak y Afganistán) más deprisa que un equipo de expertos con décadas de experiencia.

Aquel era el primer cometido de Dawson-Haggerty, quien, con su máster recién completado, acababa de incorporarse al equipo de ingenieros del Instituto de Robótica de la Universidad Carnegie Mellon. Al principio el joven se había mostrado algo nervioso; pero, a decir verdad, lo que más me preocupaba de él era su acompañante: muy fiable, pero carente de las habilidades de un ser humano.

A SU SERVICIO: Baxter posee dos brazos y una red de sensores. Ello hace que sea más fácil de programar y más seguro de manejar que los anteriores robots industriales.

Su compañero de proyecto era un robot: uno semejante a las enormes máquinas industriales que solemos asociar a las cadenas de montaje de la Ford o de General Motors. Sin embargo, mientras que esos monstruos mecánicos trabajan encerrados en jaulas para mantener a salvo a sus compañeros humanos, nosotros habíamos modificado a Spitfire (un robot soldador de cuatro metros de altura, provisto de un solo brazo y equipado de visión por láser) para que trabajase junto a un ingeniero. Y no era Spitfire el que recibía órdenes de Dawson-Haggerty. El robot solía dictar qué pasos debían tomarse, mientras que la compleja labor de situar las piezas en el lugar correcto y soldarlas se repartía entre uno y otro según la pericia de cada cual. A menudo, era el robot quien llevaba la batuta.

Gracias a esta división del trabajo, Dawson-Haggerty y su compañero robótico construyeron el armazón en diez horas por 1150 dólares, un precio que incluía la materia prima y la mano de obra. Por su parte, los expertos contratados como grupo de referencia realizaron la misma labor en 89 horas y nos facturaron 7075 dólares.



DÚO SINGULAR: Dividir el trabajo con inteligencia mejora la eficiencia. El ingeniero Dawson-Haggerty, de Carnegie Mellon, fija en su sitio una placa de acero (*izquierda*) antes de que el robot la suelde con precisión (*derecha*).

DORON GILD (*páginas anteriores*); CORTESÍA DEL INSTITUTO DE ROBÓTICA, UNIVERSIDAD CARNEGIE MELLON

La posibilidad de compartir tareas entre humanos y máquinas abre fantásticas perspectivas económicas. La compleja configuración de numerosas cadenas de montaje podría suprimirse, lo que conllevaría un ahorro de miles de millones en costes de instalación. A la hora de modificar un producto muy extendido —ya se trate de un dispositivo electrónico o de una pieza de aeronáutica—, un equipo formado por humanos y robots podría hacerlo sin necesidad de rediseñar sus herramientas. Las nuevas actualizaciones demandadas por los usuarios podrían atenderse en semanas, no años. Además, un entorno de trabajo caracterizado por constantes nuevos retos incentivaría a los trabajadores. Por estas y otras razones, habremos de aceptar que, más que como esclavos, los robots acabarán siendo más eficaces como supervisores.

MANTENER LA CALMA

Existe un amplio debate en torno a la definición exacta del término *robot*. Los expertos en robótica lo definen como una máquina capaz de percibir estímulos, tomar decisiones y actuar de manera autónoma. Esto no es del todo cierto: un termostato doméstico cumple todos esos requisitos, pero no convierte a nuestra casa en un robot. La diferencia reside en que el termostato solo desempeña una pequeña parte de las tareas de mantenimiento del hogar. Solo cuando las funciones robóticas sirven al cometido principal de un objeto puede este considerarse un robot. Así ocurre, por ejemplo, con un automóvil sin conductor que emplea sensores e inteligencia artificial para desplazarse (la función principal de un vehículo).

Los fabricantes llevan más de medio siglo usando robots para automatizar la producción. Sin embargo, estos siempre han sido diseñados con un fin específico en mente, como soldar las juntas en una cadena de montaje. A los humanos correspondía organizar y ajustar esa cadena, a fin de aprovechar al máximo la potencia y precisión robóticas.

Ese proceso da buenos resultados cuando se construyen decenas de miles de vehículos. Pero si la fabricación se personaliza en pequeños lotes ajustados a la demanda, el tiempo requerido para readaptar todos los procesos mecánicos genera grandes atascos. Adecuar los robots a una nueva tarea puede llegar a tardar varios meses, pues hay que planificar la secuencia de soldaduras, amarrar las piezas, programar el robot, preparar el material de reserva y optimizar todos los parámetros.

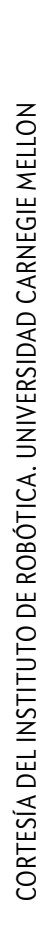
Un equipo formado por un robot y un ingeniero puede acelerar enormemente el proceso. En el pasado, los programadores debían incluir un código informático específico que explicase al robot cómo moverse. Hoy en día, basta con un fichero de diseño asistido por ordenador (CAD) para establecer una cadena de montaje inteligente. Después, unos cuantos algoritmos traducen esos diseños en una lista de tareas para el robot.

Pero organizar la cadena de montaje no constituye ni mucho menos el único desafío para conjugar humanos y máquinas. Hasta ahora, conseguir que ambos compartiesen el mismo espacio de trabajo no ha sido tarea sencilla. Los robots industriales se desplazan de un lugar a otro e insisten en llegar siempre a su destino. Están programados para repetir su tarea una y otra vez hasta que se agoten las piezas. Si un objeto rígido les impide moverse, entran en condición de error y se desactivan. Desde luego, esa opción resulta preferible a la de atravesar la cabeza de un operario, pero ni una ni otra son de demasiada ayuda. Piense en cuánto trabajo sería capaz de sacar adelante una fábrica si dos trabajadores se quedasen petrificados cada vez que se acercan demasiado.

La próxima generación de robots industriales será completamente segura para las personas. Si un robot tropieza con alguien, el golpe no será ni siquiera peligroso. Las máquinas podrán percatarse de los individuos que las rodean y comunicarse con ellos mediante sonidos, gestos, expresiones «faciales», textos y gráficos.

Ya se están fabricando robots adaptados a las necesidades de la manufactura moderna. Spitfire se basa en un diseño original de ABB, una compañía de Zúrich, al cual le hemos incorporado funciones adicionales en Carnegie Mellon. ABB ofrece





también un robot de dos brazos, Frida, concebido para funcionar con plena seguridad entre trabajadores humanos.

Rethink Robotics, una empresa de Boston creada por Rodney Brooks, cofundador de iRobot, ha desarrollado el robot Baxter, también dotado de dos brazos. Gracias a una red de sensores, programar a Baxter resulta muy sencillo: un operador lo va guiando manualmente a través de una serie de movimientos que la máquina repetirá después. Esta hazaña es posible gracias a un conjunto de algoritmos simples de aprendizaje y procesamiento de imagen. Si el operador muestra a Baxter cómo seleccionar y retirar piezas de una cinta transportadora, el robot aprenderá a hacerlo aun cuando las piezas no se sucedan de manera ordenada.

La compañía californiana Willow Garage ha creado el modelo de robot móvil PR2, equipado con dos brazos, cabeza y una red de sensores. Al igual que Frida y Baxter, fue concebido para trabajar con total seguridad junto a las personas. En Carnegie Mellon lo utilizamos para servir bebidas y aperitivos a los visitantes, una acción que suele desarrollarse en entornos relativamente caóticos.

TRATO DIFERENCIAL

Spitfire no solo aprende de las personas, sino que posee la inteligencia suficiente para instruirlas. Descompone cada gran proyecto en pequeñas etapas y reparte las tareas atendiendo a quién las ejecutará con mayor rapidez, el robot o un humano, sin importar de quién se trate.

La colaboración entre Dawson-Haggerty y Spitfire comenzó con una «lista de la compra» de los materiales necesarios. Esta fue elaborada a partir de la descripción del armazón metálico proporcionada por el fichero CAD. Después, el robot planificó qué piezas había que encargar a los proveedores, así como la manera de cortar los tubos de acero estandarizados. Por último, eligió la secuencia de operaciones más apropiada y especificó el mejor modo de sostener las piezas para que se mantuvieran fijas durante el proceso de soldadura.

También hemos equipado a Spitfire con un proyector en miniatura que le permite presentar imágenes y textos directamente sobre el armazón. Dichas imágenes se convierten en una especie de realidad aumentada: con ellas, el robot señalaba a Dawson-Haggerty cómo organizar paso a paso el complejo proceso de fabricación, dónde había que situar cada pieza y en qué orden debían sucederse las soldaduras. Dawson-Haggerty se encargaba de colocar todo en su sitio. En este caso, un humano constituía la mejor opción para llevar a cabo lo que podríamos llamar la parte «no cualificada» del trabajo, ya que las piezas pesaban relativamente poco y, dada su diversidad de formas, podían ser manipuladas con facilidad por una persona.

Spitfire se valía de su sensor láser para obtener una representación tridimensional del espacio de trabajo y cerciorarse de que las piezas guardaban la alineación correcta. Gracias a dicho sensor y al proyector, el robot podía señalar los distintos puntos del armazón y guiar el trabajo de Dawson-Haggerty.

Una vez dispuestas todas las piezas en su posición correcta, el robot relevó al humano y se hizo cargo de las soldaduras. Spitfire no solo trabaja con una rapidez enorme (puede realizar una soldadura de varios centímetros de espesor en tan solo cinco segundos), sino que sus resultados son excelentes. Por regla general, un soldador experto debe programar al robot antes de cada trabajo y proporcionarle unos 20 parámetros clave, como el voltaje, la velocidad de soldadura y el ritmo al que tiene que proveerse de hilo. En cambio, en nuestro experimento instruimos a Spitfire para que efectuase varias pruebas por sí solo a fin de optimizar dichos parámetros. A medida que avanzaban los experimentos, el robot comparaba los resultados de los diferentes intentos y reajustaba su configuración en consecuencia. Al final, aprendió sin ayuda todos los trucos para convertirse en un soldador experto.

Teniendo en cuenta que el armazón requería 400 soldaduras, las cualidades de Spitfire supusieron una enorme ventaja. Con todo, ningún robot es perfecto. Había puntos a los que Spitfire no podía acceder con facilidad. En tales casos, indicaba a Dawson-Haggerty la manera de proceder.

CON LAS LUCES ENCENDIDAS

La adopción de nuevas técnicas de fabricación suele llevar tiempo, por lo que resulta difícil predecir cuándo veremos los primeros equipos de humanos y máquinas en los talleres. No obstante, cabe pronosticar avances notables durante los próximos cinco años. Nuestra idea de cómo será la industria del futuro se antoja muy distinta de las fábricas de «luces apagadas» imaginadas por Kurt Vonnegut para su novela *La pianola* (1952), donde las máquinas trabajaban solas. En su obra, la robotización torna obsoleto el trabajo manual, lo que provoca que muchos acaben sintiendo su vida vacía. Sin duda, una senda tan inaceptable como innecesaria.

Una mejor manera de progresar sería que robots y humanos cooperasen en equipos en los que cada uno llevase a cabo la tarea más adecuada a sus capacidades. Parece razonable esperar que aún podremos sentirnos satisfechos de tomar parte en el proceso de fabricación, aunque en ocasiones ello implique acatar las órdenes de una máquina.

David Bourne *es científico de sistemas en el Instituto de Robótica de la Universidad Carnegie Mellon.*

Materiales del futuro

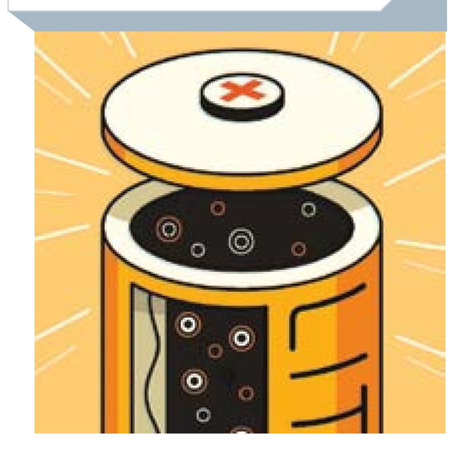
Siete nuevos materiales que prometen una perfección insólita

Steven Ashley

Baterías perpetuas

Los nanotubos de silicio podrían lograr que las baterías recargables multiplicasen por veinte su vida útil. A menudo, las baterías de iones de litio sufren averías debido a la continua expansión y contracción que experimenta el ánodo como consecuencia del flujo de portadores de carga. Un equipo de investigadores de la Universidad Stanford ha creado una nueva clase de ánodo formado por nanotubos de silicio que, a su vez, se encuentran rodeados por capas permeables de óxido de silicio. Estas últimas impiden que los nanotubos se expandan demasiado, por lo que el flujo de iones de litio no los estropearía. Mientras que las baterías de iones de litio actuales soportan entre 300 y 500 ciclos de carga y descarga, las de nanotubos de silicio aguantarían hasta 6000 ciclos conservando más del 85 por ciento de su capacidad inicial.





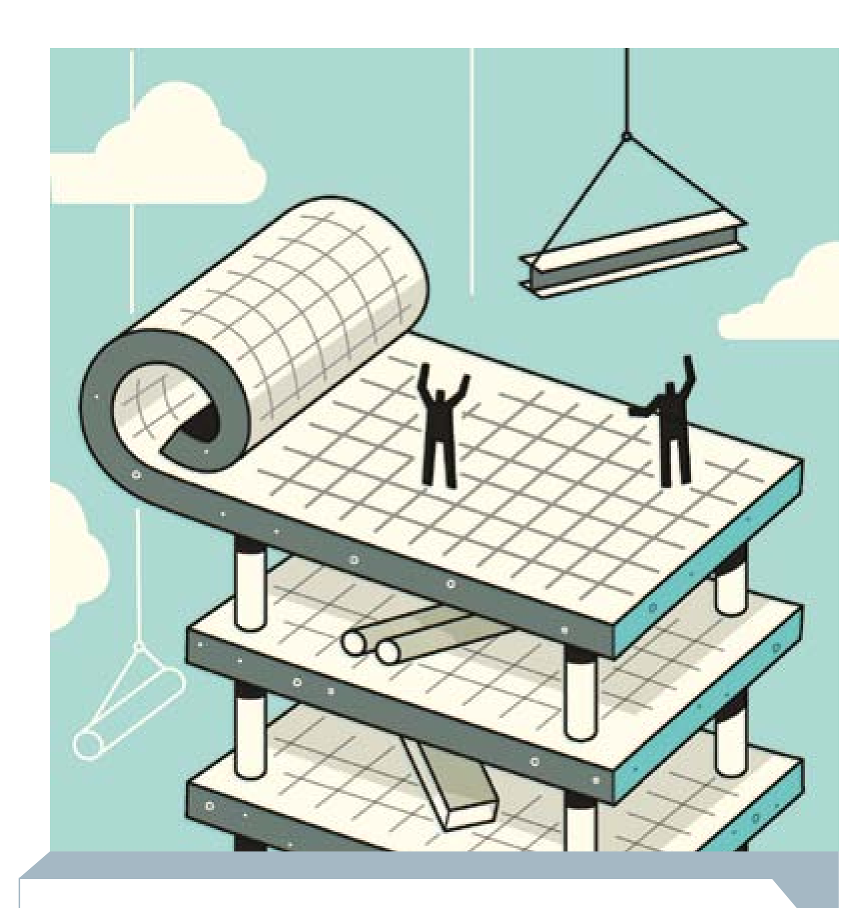
Relleno para trajes espaciales

Los aerogeles de sílice superaislantes contienen una proporción de aire en volumen superior al 85 por ciento, razón por la que se les llama «humo sólido». Sin embargo, son quebradizos, como el poliestireno extruido. El Centro de Investigación Glenn, de la NASA, y el Instituto Aeroespacial de Ohio, ambos en Cleveland, ofrecen una alternativa 500 veces más fuerte. Fabricados a partir de poliimidas resistentes al calor, estos nuevos aerogeles resultan tan flexibles que pueden doblarse por la mitad. La NASA espera utilizarlos como aislante para trajes espaciales o como parte de los desaceleradores que, con forma de paracaídas, permiten depositar con suavidad una carga en la superficie de Marte.

Papel de lija resbaladizo

El Instituto Wyss para la Ingeniería Inspirada en la Biología, de Harvard, ha desarrollado un recubrimiento tan resbaladizo que hace que la melaza resbale por una superficie como si fuese aceite de oliva. Bautizadas como «superficies porosas resbaladizas embebidas en líquido» (SLIPS), podrían emplearse para eliminar el rozamiento en los oleoductos, impedir la formación de hielo en las alas de los aviones o borrar pintadas de las paredes. Químicamente inerte, la sustancia se infiltra en sólidos porosos o con relieves, como las paredes de hormigón, y forma sobre ellos una película lubricante.

ILUSTRACIONES DE HARRY CAMPBELL



Plástico vegetal

La lignina, un polímero natural extraído de las plantas, podría reemplazar en un futuro al bisfenol A, el compuesto empleado para fabricar el plástico de los faros de automóvil, las gafas, los DVD o los biberones, pero que, sin embargo, adolece de riesgos potenciales para la salud. El Instituto de Investigación Tecnológica e Industrial de Zhudong, en Taiwán, ha comenzado a emplear la lignina como componente básico de una nueva generación de plásticos; entre ellos, un barniz protector para el interior de las latas de comida y un sustituto de las espumas de poliéster y poliuretano.

Hormigón flexible

Estas nuevas telas de hormigón pueden transportarse en rollos o láminas flexibles, lo que evita la milenaria necesidad de verter el hormigón a pie de obra. El nuevo material se provee en forma de grandes hojas enrolladas en un cilindro, que después se despliegan y se rocían con agua. Una vez secas, se endurecen y adquieren la rigidez suficiente para revestir una zanja, detener la erosión de un terraplén o reforzar un muro. El invento consta de una capa de hormigón en polvo emparedada entre dos superficies de tejido conectadas por fibras. Las fibras y el polvo de hormigón extraen el agua de la tela y, al secarse, se convierten en una matriz dura.

Trajes incombustibles

Los uniformes militares deben proteger del fuego y el calor. Sin embargo, las telas empleadas a tal efecto o bien resultan muy pesadas o no aíslan del calor. Para solucionarlo, la empresa Milliken & Company se ha decidido por el último material que cabría imaginar: el algodón. Los investigadores tratan el tejido con un aditivo de fósforo que favorece la carbonización; de esta manera, el residuo aísla la tela e impide que continúe ardiendo.



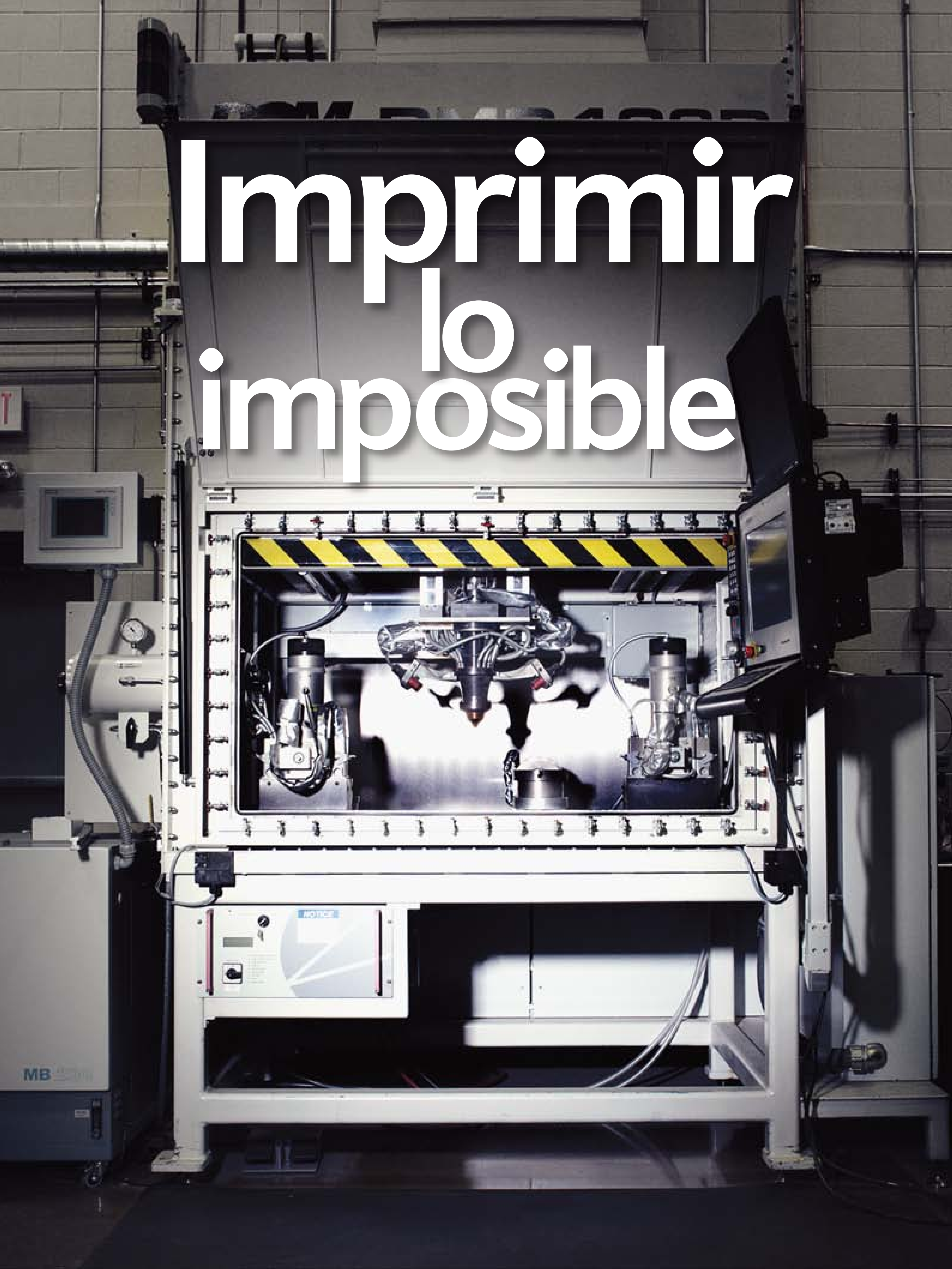
Acero por ordenador

Uno de los retos más arduos de la metalurgia consiste en desarrollar aleaciones para el tren de aterrizaje de los aviones militares: estas no solo deben gozar de una solidez superlativa, sino que han de ser lo más ligeras posible. El grupo de Gregory B. Olson, experto en materiales de la Universidad Noroccidental de EE.UU. y científico jefe de Ques Tek Innovation, ha creado dos aleaciones de acero inoxidable que, al contrario de las costosas aleaciones de titanio y acero actuales, no necesitan un blindaje de cadmio para protegerse de la corrosión. Estas nuevas aleaciones se encuentran entre las primeras que han sido desarrolladas con una serie de modelos informáticos potencialmente revolucionarios que simulan la termodinámica de los compuestos químicos.



__Steven Ashley__ es escritor y editor especializado en ciencia y tecnología.

Imprimir lo imposible





¿Revolucionará la impresión en 3D la fabricación tradicional?

Larry Greenemeier

MANOS RUDAS: **Esta prótesis se montó a partir de 46 partes de titanio impresas por separado. El Laboratorio Nacional de Oak Ridge, en EE.UU., planea ahora fabricarla de una sola pieza.**

TRAVIS RATHBONE

La prótesis robótica del Laboratorio Nacional de Oak Ridge parece sacada de una armadura medieval: una mano envuelta en cota de malla, más apropiada para blandir una espada que para asir una taza de café. Pero tanto su esqueleto interno como la delgada red que la recubre se componen de titanio, un material duradero y manejable a la par que liviano. Y los diminutos mecanismos hidráulicos que mueven los dedos dependen de una red de conductos que han sido integrados en la prótesis sin necesidad de taladros, manguitos ni juntas.

Lo que hace especial a la prótesis no son sus habilidades, sino la manera en que ha sido construida. Fue diseñada por ordenador y ensamblada a partir de unas pocas docenas de piezas impresas según la técnica de fabricación aditiva, más conocida como impresión tridimensional. El invento de Oak Ridge deja entrever el futuro de la fabricación: en cuestión de horas, podrán imprimirse objetos antaño imposibles de confeccionar.

«Se trata de un diseño extremadamente complejo y cuyo sistema hidráulico puede funcionar con más de 200 kilogramos por centímetro cuadrado», explica Craig Blue, director del programa de materiales energéticos de Oak Ridge. «La malla sirve para aligerar la estructura, pues añade material solo allí donde se necesita. No existe ninguna otra técnica capaz de construir algo así», subraya.

Mientras la impresión en 3D continúa madurando, los grandes fabricantes como Boeing y General Electric ya han comenzado a emplearla en sus líneas de producción más avanzadas. Al contrario que la fabricación tradicional, basada en tomar un bloque de material y tallar en él la pieza que se desea, la impresión en 3D construye los objetos depositando la sustancia capa a capa. Ello podría cambiar todas las etapas del proceso de fabricación, desde el diseño de prototipos hasta la producción en masa.

Con todo, la impresión en 3D debe aún hacer frente a varios problemas. Comparada con la fabricación sustractiva ordinaria, la fabricación aditiva resulta lenta. Además, el acabado de las piezas no siempre se halla exento de imperfecciones. Aún persisten las dificultades para fabricar objetos complejos compuestos por varios materiales y, por el momento, la técnica tampoco puede integrar circuitos electrónicos sin achicharrarlos.

Los investigadores se esfuerzan por superar esas limitaciones. Hoy por hoy, pocos ponen en duda que la impresión en 3D promete un campo inmenso de aplicaciones personales en la fabricación de objetos de tamaño reducido. Y si la técnica progresa hasta llegar a la producción en serie, podría traer consigo una revolución en toda regla.

DEL PROTOTIPO A LA FÁBRICA

Los orígenes de la impresión en 3D se remontan a finales de la década de los ochenta, cuando algunas empresas y grupos de investigadores, sobre todo en la Universidad de Texas en Austin, idearon máquinas que en cuestión de minutos convertían un diseño digital en modelos tridimensionales. Durante las décadas siguientes, estos instrumentos y otros semejantes, que al principio costaban unos 175.000 dólares, demostraron ser una valiosa ayuda para aquellos inventores e ingenieros que deseaban construir prototipos con rapidez y a un coste moderado.

Desde entonces, la impresión en 3D ha seguido dos direcciones. En un extremo, a aficionados y emprendedores se les presenta la oportunidad de improvisar todo tipo de modelos de plástico con máquinas que no superan los 2000 dólares. Ello facilita la creación de nuevos objetos, lo cual ha llevado a comparar la impresión en 3D con los ordenadores personales. «Internet, la nube o la programación de código abierto han permitido que grupos pequeños se pasen seis meses comiendo poco más que sopa de fideos mientras desarrollan una nueva aplicación, para luego divulgarla y ver si interesa a alguien. El mismo fenómeno comienza a darse ahora con los productos manufacturados», explica Tom Kalil, director adjunto de tecnología e innovación en la Oficina de Política Científica y Tecnológica de la Casa Blanca.

En el otro extremo, los grandes fabricantes están desarrollando métodos industriales para producir piezas de avión y dispositivos biomédicos, como prótesis de cadera. Para ello se requieren máquinas equipadas con aparatos láser y cuyo precio no baja de los 30.000 dólares. Sus productos, sin embargo, pueden llegar a venderse por un millón de dólares. Estas impresoras utilizan polímeros, metales u otros materiales líquidos o en polvo. El proceso parte de un diseño digital, por lo que sus creadores pueden ajustarlo antes de que comience la construcción sin que ello implique grandes repercusiones en el coste.

Para 2030 la impresión en 3D podría haber reemplazado varios de los procesos tradicionales de producción en masa, como la fundición, el moldeado y el mecanizado, sobre todo en la fabricación de series limitadas o de productos personalizados. Así al menos lo contempla el informe «Global Trends 2030: Alternative Worlds», publicado el pasado mes de noviembre por el Consejo Nacional de Inteligencia, un grupo asesor de la Oficina del Director Nacional de Inteligencia de EE.UU. De momento, esa tendencia la encabezan las compañías aeroespaciales. General Electric Aviation, que lleva casi cien años fabricando motores de aviación, acaba de comprar dos proveedoras especializadas en la producción de piezas de aeronaves por fabricación aditiva. Por su parte, Boeing ya construye por impresión en 3D más de 22.000 partes de sus aviones civiles y militares.

Esas compañías se han percatado de que la impresión en 3D puede superar a la fabricación tradicional en eficiencia energética o en economía de materiales. «No es raro que, al obtener una pieza [por métodos tradicionales], el 80 o el 90 por ciento del bloque con el que se comienza acabe en el suelo hecho esquirlas», explica Terry Wohlers, consultor jefe y presidente de Wohlers Associates, una consultora de fabricación aditiva de Colorado.

ROMPER MOLDES

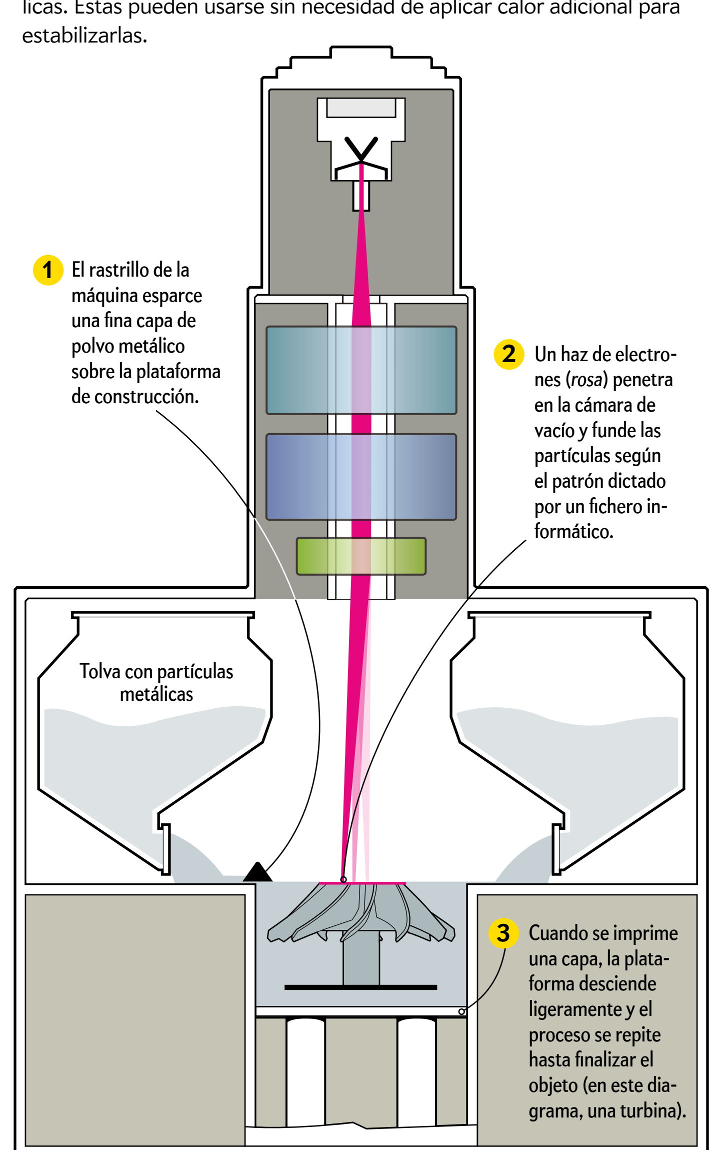
Pese a las ventajas señaladas, numerosos fabricantes opinan que la impresión en 3D se adapta mejor a la construcción de prototipos que a la fabricación industrial. Las principales razones que esgrimen son tres: su lentitud, una calidad irregular en el acabado y la dificultad para elaborar objetos complejos.

La técnica procede relativamente despacio, sobre todo cuando se desean obtener detalles muy finos. El grupo de Oak Ridge, dirigido por el diseñador Lonnie Love, invirtió 24 horas en fabricar las piezas de su mano robótica de 730 gramos más otras 16 en el ensamblaje. (En estos momentos se encuentran desarrollando un equipo que imprimirá la prótesis de una sola pieza.) Según Richard Martukanitz, codirector del Centro para el Procesamiento Innovador de Materiales mediante Deposición Digital Directa, de la Universidad de Pensilvania, imprimir un objeto poco mayor que una pelota de béisbol con detalles bien definidos lleva entre seis y ocho horas. A ese ritmo, se necesitarían años para obtener miles de unidades.

ASÍ FUNCIONA

Capa a capa

Para construir su prótesis robótica, los investigadores de Oak Ridge emplearon una máquina de fusión por haz de electrones (EBM). La elevada temperatura alcanzada en el proceso funde aleaciones de titanio o de cromo y cobalto en polvo, a partir de las cuales crea las piezas metálicas. Estas pueden usarse sin necesidad de aplicar calor adicional para estabilizarlas.



FUENTE: ARCAM.COM; GEORGE RETSECK (*ilustración*)

Algunas impresoras trabajan más deprisa. Las desarrolladas por la Marina estadounidense llegan a depositar entre 10 y 20 kilogramos de material a la hora. Esa velocidad, sin embargo, se logra a expensas de la precisión; una vez impresas, las piezas necesitan ser refinadas. Para abreviar el proceso se están investigando sistemas que imprimen a velocidad variable: con mayor rapidez cuando se trata de depositar el grueso del material, pero más despacio cuando deben perfilarse los detalles. «Hoy en día esa idea está acaparando gran atención, dadas las limitaciones en productividad de la fabricación aditiva», puntualiza Martukanitz.

Otra manera de acelerar el proceso consistiría en distribuir las distintas fases del trabajo entre varias fábricas. Sin embargo, ello exigiría un grado de estandarización mayor que el actual. Una empresa como General Electric debe poder garantizar que todas las piezas de sus motores son idénticas, con independencia del proceso adoptado por la compañía o cualquiera de sus proveedores. La organización ASTM International (la antigua Sociedad Americana de Pruebas y Materiales) ha comenzado a diseñar estándares para el proceso de impresión en 3D, si bien la iniciativa se encuentra aún en una fase temprana.

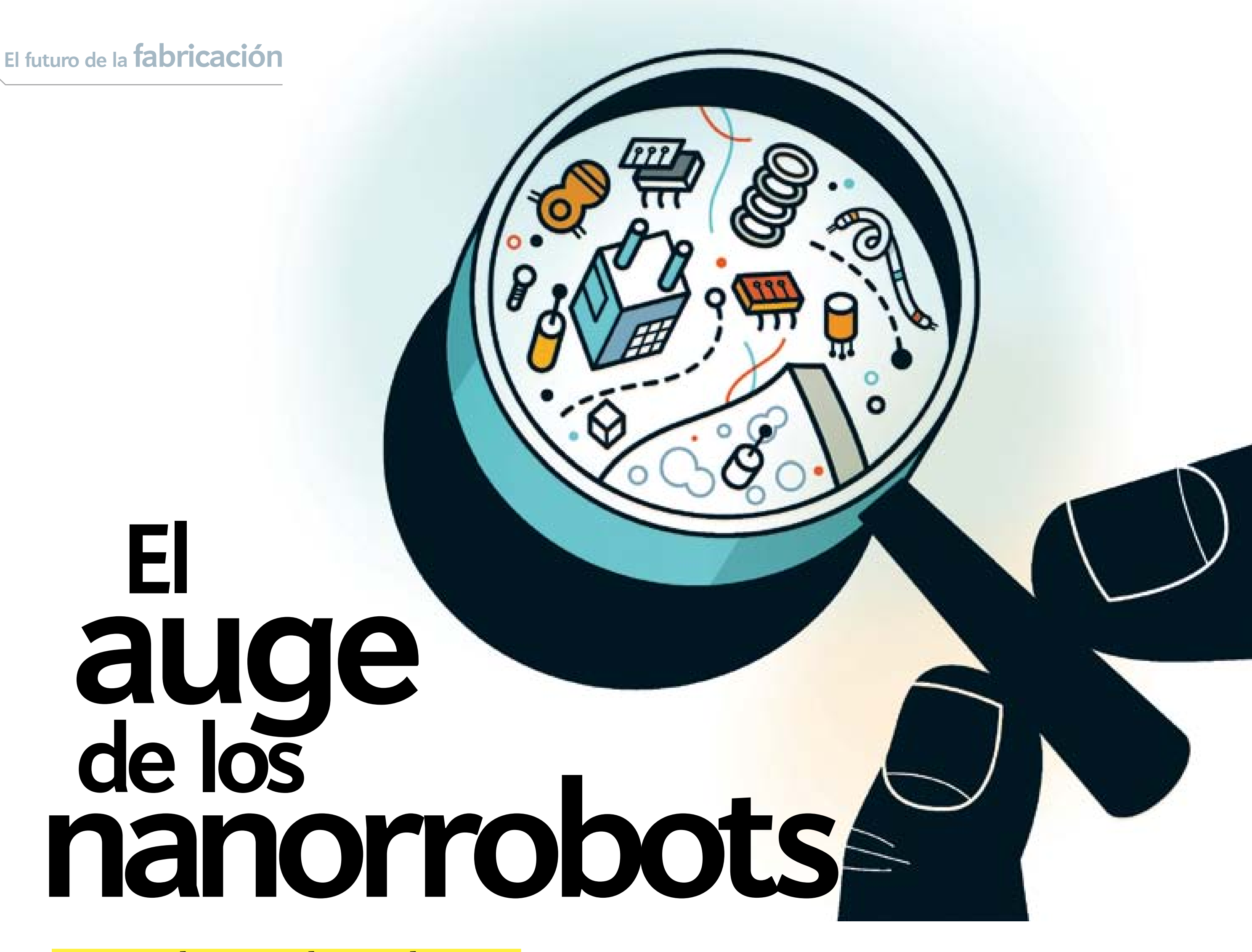
Con el fin de fabricar en masa objetos idénticos, se está investigando la posibilidad de desarrollar impresoras tridimensionales que puedan supervisar su propio trabajo. A la par que se construye una pieza, la máquina analizaría vídeos de alta velocidad o se valdría de termografía por infrarrojos para detectar fallos, los cuales corregiría al instante sin detener el proceso de fabricación. «Bastaría con descargar en la impresora el plano de la pieza en cuestión para lograr un acabado perfecto», señala Blue.

La complejidad creciente de los productos, que cada vez incluyen más materiales y componentes electrónicos, plantea un nuevo desafío a la impresión tridimensional. Una posible solución consistiría en desarrollar impresoras en 3D equipadas con múltiples cabezales de extrusión, cada uno de los cuales depositaría un tipo de sustancia. En particular, uno de ellos podría servir para incorporar cables al objeto.

En Oak Ridge, en el Centro W. M. Keck de la Universidad de Texas y en otros lugares se están investigando diversas maneras de imprimir circuitos electrónicos. En general, el objetivo consiste en evitar el sobrecalentamiento y el daño que sufren los componentes cuando a su alrededor se depositan capas de plástico o de metal. Una alternativa pasaría por imprimir material aislante en torno a dichos componentes a fin de protegerlos. «En la próxima década veremos circuitos electrónicos impresos sobre otros materiales», predice Blue.

Los avances mencionados ofrecen buenas perspectivas para la mano robótica de Oak Ridge, por no hablar de los beneficios para sus usuarios potenciales. Los investigadores prevén un futuro en el que será posible escanear la mano sana de una persona, construir una réplica electrónica y, a partir de ella, imprimir una prótesis lista para ser utilizada.

Larry Greenemeier *es redactor de* Scientific American.



El auge de los nanorrobots

Dentro de poco dispondremos de una nueva generación de dispositivos diseñados íntegramente a escala atómica

Mihail C. Roco

Durante décadas, la fabricación industrial ha sido sinónimo de enormes cadenas de montaje. En ellas, una multitud de operarios —humanos o robots— puede llegar a construir desde un avión hasta objetos más pequeños y delicados, como fármacos, ordenadores o teléfonos inteligentes.

Imagine un futuro en el que el ensamblaje de procesadores y memorias digitales, generadores de energía, tejidos artificiales y aparatos clínicos tenga lugar a escalas imperceptibles a simple vista. Esa nueva era comenzará dentro de pocos años. Una vez llegue, pasaremos de disponer de productos que simplemente contienen nanotecnología (como las lociones de protección solar con partículas de dióxido de titanio para bloquear la radiación ultravioleta, o las nanopartículas que aumentan la calidad de las imágenes clínicas, por mencionar dos ejemplos) a otros fabricados íntegramente a escala nanométrica [*véase* «¿Podemos hacer más con menos?», por Xavier Obradors, *en este mismo número*].

Para ello no solo deberemos mejorar nuestra comprensión de la materia a nivel atómico, sino que habremos de concebir nuevas herramientas y procesos de ensamblaje. Una manera de enfocar el problema procede de abajo arriba: las unidades menores, como átomos o nanotubos, por ejemplo, se unen para formar componentes de mayor tamaño. También pueden emplearse cadenas de ADN, así como otras moléculas naturales o de síntesis, a modo de materiales programables para construir motores y otros dispositivos a escala molecular. Otro método lo hallamos en el ensamblaje por rollos, consistente en imprimir dispositivos en miniatura sobre bobinas continuas de láminas de polímero.

La nanofabricación requerirá herramientas de una precisión extraordinaria, desde catalizadores químicos hasta otras de tipo biológico, óptico, mecánico o electromagnético. A más largo plazo, cabe esperar que entre esas herramientas se incluyan nuevas moléculas y metamateriales, sustancias elaboradas ex profeso para que posean propiedades que no se observan en la naturaleza.

A continuación presentamos algunos de los avances más prometedores de la nanotecnología y sus aplicaciones futuras.

Mihail C. Roco es asesor de nanotecnología en la Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU.

HARRY CAMPBELL

Tejidos cibernéticos

Puede que en un futuro logremos incorporar a nuestro organismo tejidos artificiales entrelazados con nanocircuitos electrónicos. En vez de implantar dispositivos electrónicos en un órgano, el nuevo tejido crecería sobre un andamiaje formado por nanosensores. El tejido sintético podría diseñarse para detectar y controlar patologías muy diversas, mientras que el andamiaje permitiría conectar una parte del sistema nervioso a un ordenador, una máquina u otro tejido vivo. Un grupo de científicos de Harvard y del Instituto de Tecnología de Massachusetts ha construido un andamiaje de nanohilos elásticos que puede conectarse a células individuales. Explican que su objetivo consiste en fusionar el tejido con los componentes electrónicos de tal modo que resulte difícil decir dónde acaba el primero y dónde empiezan los segundos.

Memorias diminutas

La nanotecnología se presta muy bien a fabricar memorias electrónicas más eficientes, económicas y con mayor capacidad. El objetivo no es baladí, ya que antes o después llegará el momento en que los microcircuitos no podrán seguir reduciéndose mediante la técnica de semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS) usada durante décadas para fabricar circuitos integrados. El problema puede sortearse empleando el espín del electrón como elemento portador de información, tanto en memorias como en circuitos lógicos. IBM, Intel y otras compañías ya han comenzado a desarrollar memorias espintrónicas y otros dispositivos de bajo consumo que prometen operar con fiabilidad y rapidez.

Otro método consiste en escribir y almacenar datos con ayuda de nanoimanes. Un equipo de la Universidad Cornell ha diseñado un procedimiento eficiente para cambiar la polarización de un imán, lo que podría suponer un primer paso para fabricar una memoria RAM magnética (MRAM) que almacene datos aunque se suprima la alimentación. Al aplicar corriente a una capa de tantalio con un patrón litografiado, se produce una desviación de los espines lo bastante intensa como para invertir la magnetización de un imán cercano. Para restituir el sistema a su estado original, basta con invertir la corriente. Cuando esta no se aplica, el imán permanece estable, por lo que puede retener datos. La técnica tal vez permita fabricar teléfonos o tabletas que podrían encenderse y apagarse instantáneamente sin perder los datos y sin gastar energía en el modo de espera (*standby*).

Microcircuitos de luz

Los circuitos fotónicos integrados, cuyo vehículo de información es la luz, deberían contribuir a la miniaturización de los dispositivos electrónicos. Sin embargo, persiste aún un problema fundamental: las leyes de la difracción no permiten confinar la luz en un espacio inferior a la mitad de su longitud de onda. Sin embargo, la luz láser ordinaria presenta una longitud de onda entre 10 y 100 veces mayor que la escala típica de los dispositivos nanoelectrónicos.

A fin de superar esas limitaciones se está investigando la posibilidad de emplear láseres «plasmónicos» de estado sólido para transportar los datos. Estos constan de una rejilla de hilos semiconductores nanométricos e hilos metálicos de dimensiones similares. Las intersecciones de esa malla forman cavidades cuadradas en las que se confina la luz y cuyo tamaño puede reducirse hasta el 1 por ciento del límite de difracción: las dimensiones de un transistor en un circuito integrado. Si se consiguiese que dichas cavidades emitiesen ráfagas minúsculas de luz láser, estos dispositivos podrían servir de base a sistemas ópticos tan diminutos que podrían alojarse entre los transistores. Se trata de una línea de investigación liderada por Xiang Zhang y otros expertos de la Universidad de California en Berkeley.

Músculos de plástico

Los músculos artificiales pueden hacer que un ojo parpadee, que un pez robótico nade o que una boya extraiga energía del océano. Dentro de poco se utilizarán nanopolímeros con forma de dendrita y con capacidad para contraerse y dilatarse ante los cambios de temperatura, los cuales podrán actuar a modo de membranas celulares, dispensadores de fármacos o fibras cardíacas artificiales. Un equipo de la Universidad de Pensilvania dirigido por Virgil Persec ha demostrado que, a pesar de su delgadez, dichos polímeros pueden levantar una moneda con un peso 250 veces superior al suyo. El principal reto para su fabricación consiste en encontrar polímeros capaces de autoensamblarse en estructuras que se comporten como músculos en miniatura (por ejemplo, como tejido cardíaco).

Centrales eléctricas de virus

Los virus pueden usarse para construir generadores de energía a escala nanométrica. A tal fin sirve el bacteriófago M13 manipulado genéticamente: con forma de varilla de unos siete nanómetros de diámetro y 900 nanómetros de longitud, este virus convierte energía mecánica en energía eléctrica y viceversa. Seung-Wuk Lee, de la Universidad de California en Berkeley, lo ha empleado para construir un material piezoeléctrico capaz de alimentar una pantalla LCD de 10 centímetros cuadrados. Este método aprovecha la capacidad única de la naturaleza para sintetizar biomateriales en los virus, los cuales pueden replicarse, evolucionar y ensamblarse con precisión atómica. Los materiales piezoeléctricos de base vírica podrían alimentar futuros sensores nanométricos y otros dispositivos clínicos dentro o fuera del cuerpo humano a partir de la energía vibratoria de, por ejemplo, un latido de corazón.

Fábricas virtuales

Las simulaciones digitales han logrado tal nivel de precisión que las compañías ya pueden someter un producto a todo tipo de pruebas antes de fabricar el primer prototipo

James D. Myers



LAVADO DIGITAL: **La compañía P&G empleó simulaciones informáticas a gran escala para asegurarse de que sus cápsulas de detergente (*arriba*) se avendrían con el caótico entorno de una lavadora.**

TRAVIS RATHBONE

Cuando Thomas Edison inventó la lámpara incandescente hace más de 130 años, ensayó miles de prototipos. Su metódica paciencia nos maravilla aún hoy. Pero si un inventor moderno siguiera un método semejante, provocaría más risas que admiración: cada vez más, la investigación y el desarrollo de nuevos productos transcurren en el mundo de los bits.

En la actualidad, la diferencia entre las tecnologías emergentes y aquellas que languidecen puede achacarse a la computación de alto rendimiento. En la «fabricación digital» intervienen millones de procesadores antes de que se produzca la primera pieza física. Los productores de bienes domésticos emplean hoy simulaciones digitales muy superiores a las que hace años introdujo la industria aeroespacial. Esta estrategia no solo abarata el diseño y la producción, sino que consigue convertir una idea en un artículo sobre el mostrador con gran rapidez. Los modelos computarizados dictan el aspecto que debe adoptar un objeto, la manera de fabricarlo, su composición y su comportamiento. La ley de Moore predice que la potencia de cálculo de un procesador se duplica cada 18 meses, por lo que las posibilidades de la computación de alto rendimiento deberían multiplicarse por mil en los años venideros. En palabras del Consejo de Competitividad, una organización sin ánimo de lucro radicada en Washington, nos adentramos en una era en la que «competir es computar».

Los ejemplos siguientes dan una idea de los últimos avances en fabricación digital, así como algunas pistas sobre su futuro.

James D. Myers *es director adjunto de investigación y desarrollo en el Centro Computacional para Innovaciones Nanotecnológicas del Instituto Politécnico Rensselaer.*

Cápsulas de detergente

Los técnicos de Procter & Gamble (P&G) saben que los consumidores no solo no prestan atención al modo en que se elaboran los productos cotidianos, sino que consideran «sencilla» la fabricación de artículos esenciales como alimentos, productos de limpieza e incluso el papel higiénico. (La máquina que P&G emplea para producir su papel higiénico cuesta cerca de 250 millones de dólares; contiene más piezas móviles y requiere más líneas de código de programación que numerosos aviones militares.) Hace unos años, cuando todavía poseía la marca de patatas fritas Pringles (hoy en manos de Kellogg), P&G efectuó una simulación informática del flujo de aire que recorría las láminas de patata en su rápido descenso por la cinta de producción. Los ajustes logrados evitaron que las patatas saliesen volando por los aires.

Las cápsulas de detergente Tide Pod presentan un nivel de complejidad muy superior. Cuentan con tres compartimentos que almacenan un detergente líquido, un quitamanchas y un blanqueador, todo ello envuelto en una película soluble. P&G consumió millones de horas de cómputo para asegurarse de que el envoltorio reaccionaría de la manera adecuada con el agua de la lavadora y que liberaría los líquidos con eficacia.

Gran parte de ese tiempo se dedicó a diseñar la fabricación de las cápsulas. Mediante análisis estructurales, P&G calculó y redujo al mínimo las arrugas que experimentaría la película al cortarla. Los cálculos de dinámica de fluidos sirvieron para determinar el modo más rápido de llenar las bolsas sin verter detergente sobre sus bordes, lo que hubiera dificultado sellarlas.

Los líquidos basados en tensioactivos poseen propiedades peculiares, por lo que P&G se vio obligada a usar una modelización molecular para entender la manera en que la formación de nanoestructuras (micelas y vesículas) podía alterar la estabilidad y el comportamiento del producto. Los modelos digitales también ilustraron la forma que adoptaría el envoltorio, suave y blando, durante su almacenamiento, lo cual les ayudó a diseñar el envase en el que se venden. Hoy, cada paquete se ensambla en un segundo y con una tasa de fallos inferior a uno entre mil millones.

Bombas industriales

Pese a los éxitos de P&G, la fabricación digital supone todo un reto que requiere al menos tres cambios: sustituir los equipos físicos por ordenadores, abandonar los métodos aproximados en favor de técnicas más complejas y precisas, y pasar de una cultura basada en resolver los problemas cuando se presentan a otra fundada en predecirlos.

La empresa neoyorkina ITT Goulds Pumps viene fabricado bombas industriales de todo tipo desde mediados del siglo XIX. Pero, a diferencia de P&G, Goulds no poseía los recursos necesarios para crear su propia fábrica digital. Por ello acudió al Centro Computacional para Innovaciones Nanotecnológicas, un consorcio del Instituto Politécnico Rensselaer, IBM y el estado de Nueva York. Con su ayuda, Goulds transformó sus diagramas de diseño asistido por computador en modelos tridimensionales «mallados», o fragmentados en millones de pequeñas zonas en las que puede calcularse la circulación del fluido. También creó varios modelos para evaluar el diseño de sus bombas, lo que acabó mereciéndole un premio por el desarrollo de una nueva clase de bomba hidráulica. De cara al futuro, la empresa planea usar técnicas de computación en paralelo a gran escala para evitar la formación de burbujas (cavitación).

Jeco Plastic Products, en Indiana, vivió una historia semejante. En respuesta a la demanda de palés de transporte por parte de una importante compañía de automóviles, Jeco propuso unas estructuras de plástico que aventajarían a los palés metálicos que ofrecían sus competidores. Sin embargo, el coste de remodelar la fábrica para producir y probar su nuevo prototipo —sin garantía alguna de compra— alcanzaba proporciones sobrecogedoras. La compañía tampoco podía simular con precisión el nuevo diseño en sus ordenadores, por lo que decidió asociarse con la Universidad Purdue y el Centro de Supercomputación de Ohio. El consorcio desarrolla los programas informáticos, compra tiempo de computación y enseña a fabricantes menores la nueva técnica. Jeco estima que un nuevo pedido y la penetración en el mercado podrían aportarle 23 millones de dólares y la creación de 15 puestos de trabajo.

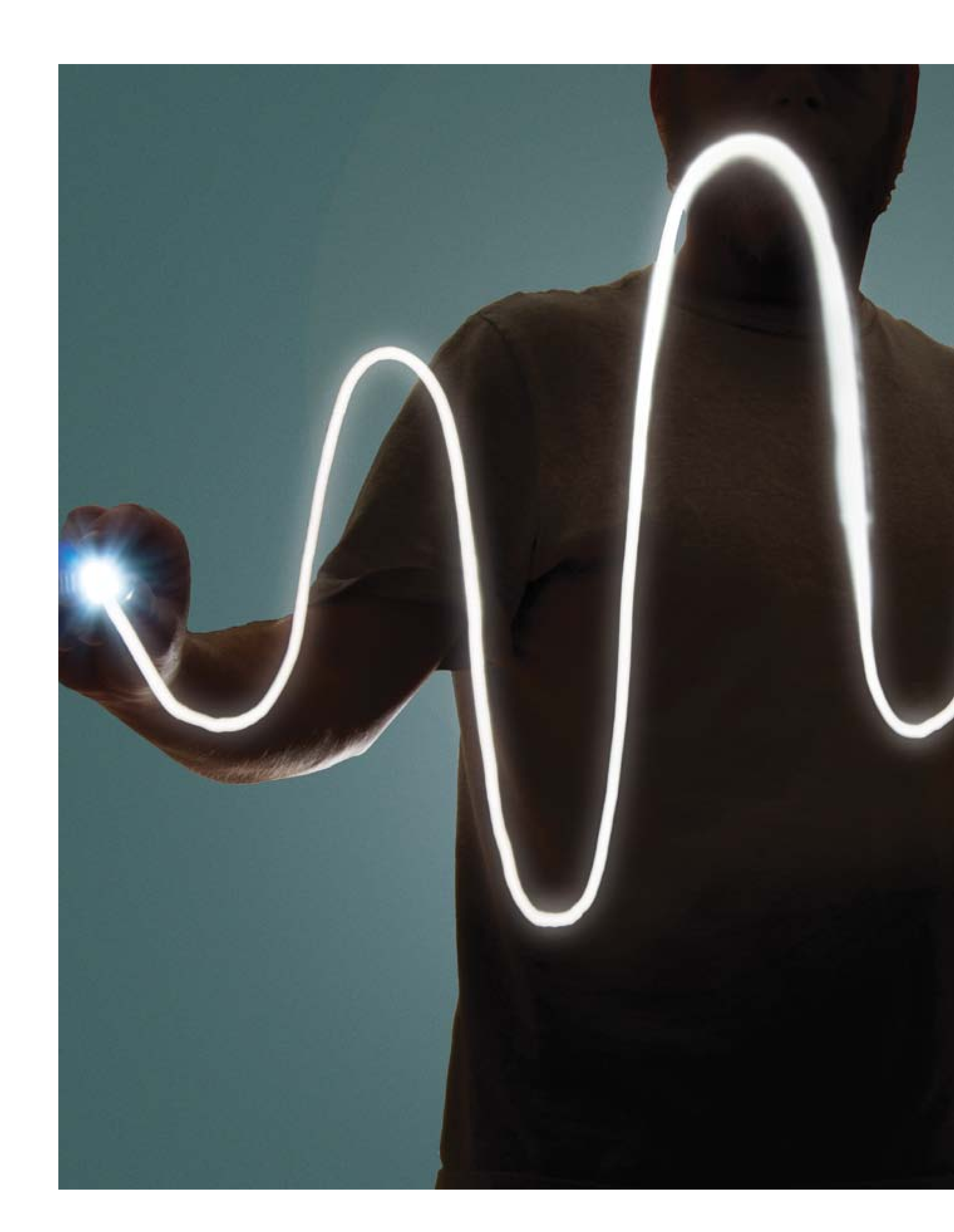
Digital de nacimiento

Cuando las combinaciones de materiales, diseños y procedimientos se cuentan por millones —y no por miles, como en el caso de Edison—, la posibilidad de explorar multitud de opciones al mismo tiempo quizá constituya la única manera de introducir nuevos productos en el mercado. Pliant Energy Systems lo sabe muy bien. Esta joven empresa de Brooklyn ha concebido un método potencialmente revolucionario para generar energía a partir de las corrientes de agua. Su idea se basa en el empleo de materiales inteligentes que, al doblarse, generan electricidad. Los dispositivos hidrocinéticos de Pliant podrían producir energía sin más que sumergirse en una corriente. Sin embargo, la variedad de opciones de diseño y la dificultad de construir prototipos físicos para analizar su comportamiento hicieron imprescindible partir de un análisis computacional.

Modelizar el flujo del agua en una corriente requiere un sistema de computación en paralelo a gran escala. Predecir cuántos tubos de polímero electroactivo se doblarán a merced de un torrente —por no hablar de optimizar la potencia de un dispositivo compuesto de tales materiales— exige acoplarlos a un modelo de corrientes de agua, lo cual lo sitúa en el límite de las posibilidades de la computación de alto rendimiento. En colaboración con Rensselaer, Pliant consiguió una subvención de 300.000 dólares de la Administración de Pequeñas Empresas estadounidense. En parte, la ayuda llegó por haber acreditado el utillaje y los conocimientos necesarios para lograr un desarrollo rentable de su propuesta. La compañía podrá ahora conseguir mejores medios para sus modelizaciones y diseñar prototipos digitales más avanzados.

El éxito de Pliant en la fabricación digital se inscribe en una tendencia más amplia. Chris Bystroff, profesor de los departamentos de biología y ciencias de la computación en Rensselaer, ha desarrollado técnicas para diseñar y fabricar proteínas a medida. Estas podrían servir como biosensores moleculares que brillarían en presencia del virus del dengue o del H5N1, por ejemplo. Bystroff y la Universidad de Nueva York en Búfalo están integrando el proceso de diseño digital en una interfaz web, la cual realiza en pocas horas lo que en un laboratorio llevaría días.

Tal vez la fabricación digital parezca un concepto familiar. Sin embargo, la aparición de ordenadores más rápidos, asequibles y con acceso a programas cada vez más complejos dará lugar a nuevos productos que, tanto si eliminan las manchas de grasa como si combaten virus, lo harán primero en la tierra de los ceros y los unos.





CALEB CHARLAND

FÍSICA

BAYESIANISMO CUÁNTICO

Una nueva interpretación de la teoría cuántica aspira a eliminar las paradojas que parecen plagar el mundo microscópico. ¿El precio? Admitir que la información cuántica solo existe en nuestra imaginación

Hans Christian von Baeyer

La mecánica cuántica predice a la perfección el comportamiento de la materia a múltiples escalas. Tanto es así que, de hecho, bien puede considerarse la teoría física más exitosa. Sin embargo, es también la más extraña.

En el mundo cuántico, las partículas aparentan encontrarse en dos sitios a la vez, la información parece viajar más rápido que la luz y hay gatos que están vivos y muertos al mismo tiempo. Los físicos han luchado contra estas presuntas paradojas durante más de nueve décadas. Al contrario de lo que ocurre con la teoría de la evolución o con la cosmología, cuyas tesis principales han permeado en el bagaje intelectual de la población, la teoría cuántica es considerada una extraña anomalía: un poderoso libro de recetas para construir todo tipo de artilugios, pero poco más. La profunda confusión que envuelve al significado de la mecánica cuántica continúa alimentando la sensación de que, a pesar de todas las lecciones que la teoría parece querer enseñarnos sobre el mundo, estas carecen de relevancia para la vida diaria y resultan demasiado estrambóticas como para darles importancia.

En 2001, un grupo de investigadores comenzó a desarrollar un modelo que, o bien elimina las paradojas cuánticas, o bien les da una forma menos preocupante. Dicha propuesta, conocida como bayesianismo cuántico (o *QBism*, a partir de sus iniciales en inglés), se basa en reinterpretar por completo la entidad matemática de la que parten todas las excentricidades cuánticas: la función de onda.

Según el punto de vista habitual, un objeto como el electrón queda caracterizado por su función de onda, una expresión matemática que codifica todas las propiedades medibles de la partícula. Si deseamos predecir su comportamiento, deberemos calcular cómo evoluciona dicha función de onda en el tiempo. El resultado del cálculo servirá para determinar la probabilidad de que, el realizar un experimento, observemos una propiedad u otra del electrón; por ejemplo, que se encuentre en cierto lugar. Pero, si damos por sentado que la función de onda es real, comenzarán a aparecer problemas.

El bayesianismo cuántico combina la mecánica cuántica con la teoría de la probabilidad. Postula que la función de onda no está asociada a una realidad objetiva; en su lugar, debe interpretarse como un «manual de instrucciones» que nos ayuda a tomar decisiones inteligentes sobre el mundo que nos rodea. En concreto, un observador empleará la función de onda para asignar un valor a su creencia personal de que un sistema cuántico posea una propiedad u otra; en el proceso, deberá reconocer que sus propias acciones afectarán al sistema de un modo inherentemente incierto. Otro observador usará una función de onda que describirá el mundo tal y como él lo ve, por lo que podrá llegar a conclusiones completamente distintas sobre el mismo sistema cuántico. Un sistema (un suceso) puede tener tantas funciones de onda como observadores. Una vez que estos se hayan comunicado entre sí y hayan modificado sus respectivas funciones de onda para incorporar la información adquirida, emergerá una visión coherente del mundo.

Vista así, la función de onda bien podría considerarse «la abstracción más poderosa jamás concebida», en palabras de N. David Mermin, físico teórico de la Universidad Cornell y uno de los recientes conversos al bayesianismo cuántico.

EL CUANTO IRREAL

La idea de que la función de onda no es real se remonta a los años treinta del siglo pasado y a los escritos de Niels Bohr. El físico danés la consideraba parte del formalismo «puramente simbólico» de la mecánica cuántica: una herramienta para calcular, pero nada más. El bayesianismo cuántico constituye el primer modelo que proporciona un armazón matemático a la aseveración de Bohr. Para ello se sirve de la estadística bayesiana, una disciplina que cuenta más de 200 años y que define la probabilidad en términos de grados de creencia subjetiva. La estadística bayesiana también nos provee de reglas matemáticas formales para ir actualizando dichos grados de creencia a medida que adquirimos nueva información. Los partidarios del bayesianismo cuántico sostienen que, si interpretamos la función de onda en términos de creencias subjetivas que se van actualizando de acuerdo con las reglas de la inferencia bayesiana, las misteriosas paradojas de la mecánica cuántica desaparecen.



Hans Christian von Baeyer es físico teórico de partículas y profesor emérito en el Colegio Universitario William and Mary, en Virginia, donde ha enseñado durante 38 años. Autor de seis libros de divulgación, sus obras le han valido varios premios; entre ellos, el del Instituto Americano de Física y el de la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia.

Consideremos de nuevo un electrón. Cada vez que efectuamos un experimento para detectarlo, lo encontramos en un lugar concreto. Sin embargo, cuando no lo miramos, la función de onda del electrón se esparce, lo que parece indicar que el electrón está en varios sitios a la vez. Pero si algo más tarde volvemos a medir su posición, lo hallaremos de nuevo en un lugar preciso. La interpretación usual de la mecánica cuántica nos dice que la observación provoca que la función de onda «colapse» hacia un solo valor (el asociado al resultado del experimento).

Debido a que el colapso de la función de onda ocurre de manera simultánea en todos los puntos, parece violar el principio de localidad, la idea según la cual todos los cambios que experimenta un objeto deben proceder de la interacción entre dicho objeto y su entorno más inmediato. De hecho, lo anterior nos lleva a algunos de los famosos rompecabezas que Einstein calificó de «espeluznante acción a distancia». Desde el nacimiento de la mecánica cuántica, los físicos han advertido en el colapso de la función de onda una propiedad paradójica y alarmante. Sus incómodas implicaciones han llevado a proponer todo tipo de versiones alternativas, con resultados muy diversos.

El bayesianismo cuántico nos dice que tales paradojas no existen. El colapso de la función de onda solo reflejaría lo que ocurre cuando un observador, de manera súbita y discontinua, actualiza las probabilidades que asigna a los diferentes sucesos. Algo muy similar a lo que hace un oncólogo que reconsidera su diagnóstico tras estudiar un nuevo TAC. El sistema cuántico no ha sufrido modificación alguna. Lo que ha cambiado es la función de onda elegida por el observador para dar cuenta de sus expectativas.

Podemos aplicar el mismo razonamiento a la famosa paradoja concebida por Erwin Schrödinger en 1935. Imaginemos una caja sellada herméticamente, en cuyo interior hay un gato vivo, un átomo radiactivo y un vial lleno de gas venenoso. Dicho átomo es tal que, según las reglas de la mecánica cuántica, cuenta con una probabilidad del 50 por ciento de desintegrarse en el plazo de una hora. Si eso ocurre, la desintegración activará un martillo, el cual romperá la botella, liberará el veneno y matará al gato. En caso contrario, el animal sobrevivirá.

Supongamos ahora que realizamos el experimento, pero sin mirar dentro de la caja. La teoría cuántica tradicional nos dice

EN SÍNTESIS

La interpretación de la teoría cuántica sigue suscitando debates. Una propuesta reciente, el bayesianismo cuántico, combina la mecánica cuántica con el enfoque bayesiano de la teoría de la probabilidad.

El bayesianismo cuántico reinterpreta uno de los objetos fundamentales de la teoría cuántica: la función de onda. Esta entidad matemática es la que permite calcular la probabilidad de obtener un resultado u otro en un experimento.

La nueva propuesta sostiene que la función de onda no se halla asociada a ninguna realidad objetiva. En su lugar, reflejaría el estado mental subjetivo del observador, o sus expectativas sobre el mundo.

que, pasada una hora, la función de onda del átomo describe una superposición de dos estados, desintegrado y no desintegrado. Pero, al no haber observado lo que ocurre en la caja, esa superposición de estados va más allá: afecta al martillo y al vial con el veneno. Y, lo que es aún más grotesco, también el gato se encuentra en una superposición de dos estados, vivo y muerto al mismo tiempo.

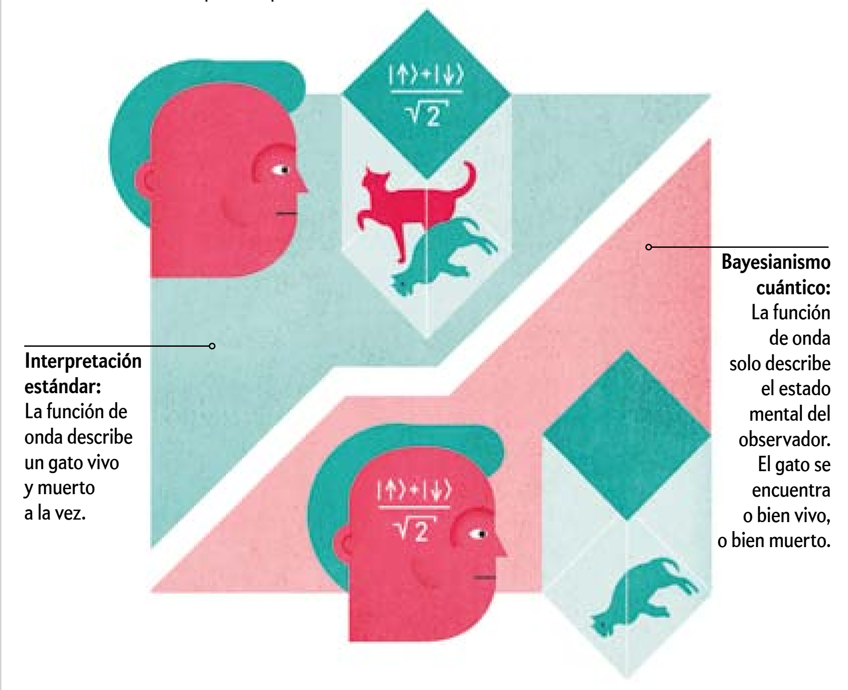
El bayesianismo cuántico resuelve la cuestión al postular que la función de onda describe una propiedad subjetiva del observador, no el estado del gato. La teoría nos dice que, *por supuesto*, el gato está vivo o muerto, no las dos cosas a la vez. Es cierto que la función de onda nos habla de una superposición de dos estados, pero estos solo se refieren a las expectativas del observador. Afirmar que el gato está vivo y muerto a la vez vendría a ser como decir que nuestro equipo de béisbol favorito se halla en una superposición de «ganando» y «perdiendo» hasta que decidimos mirar el marcador. Sería un sinsentido, un delirio megalómano, pensar que nuestro estado mental da forma al mundo.

Los proponentes del bayesianismo cuántico esperan que, al eliminar todas esas paradojas, los físicos puedan centrarse en las propiedades verdaderamente fundamentales de la teoría cuántica —sean estas las que sean—. En opinión de Mermin, ello evitaría que perdiesen el tiempo «haciéndose preguntas absurdas sobre problemas imaginarios».

ESTADOS CUÁNTICOS Y CONOCIMIENTO

¿Qué describe la función de onda?

Para analizar las diferencias entre el bayesianismo cuántico y la interpretación tradicional, conviene considerar el famoso experimento mental del gato de Schrödinger. En el interior de una caja hay un gato y una ampolla con veneno. Cierto suceso cuántico puede ocurrir (o no) con una probabilidad del 50 por ciento, en cuyo caso matará (o no) al animal. Según la interpretación usual, mientras no se observe en el interior de la caja, el gato se hallará en una superposición de los estados «vivo» (aquí representado por el símbolo (|↑⟩) y «muerto» (|↓⟩). El bayesianismo cuántico, en cambio, nos dice que la función de onda no refleja más que el estado mental del observador: el gato está vivo o muerto; la superposición solo existe en la mente del experimentador durante el tiempo en que este desconoce el estado del animal.



EL ALBOROTADOR

El bayesianismo cuántico nació en un artículo corto publicado en enero de 2002 que llevaba por título «Probabilidades cuánticas como probabilidades bayesianas». Fue escrito por los expertos en información cuántica Carlton M. Caves, de la Universidad de Nuevo México, Christopher A. Fuchs, por entonces en los Laboratorios Bell, y Rüdiger Schack, de la Universidad de Londres. La diversidad de sus afiliaciones académicas (un departamento de física, otro de matemáticas y un laboratorio industrial) refleja el carácter interdisciplinar de su trabajo.

En la última década Fuchs se ha trasladado al Instituto Perimeter, en Canadá, y ha asumido el cargo de portavoz del bayesianismo cuántico. Caracterizado por un irreverente sentido del humor, quienes le conocen no se sorprenden al ver que un artículo suyo comienza con las palabras: «En este artículo trato de causar algunos problemas cordiales». Su estilo se basa en la convicción de que la ciencia es una actividad comunal y de que los avances solo llegan tras enérgicos debates intelectuales. Muy activo, viaja con frecuencia por todo el mundo organizando conferencias, presidiendo comités e impartiendo clases.

Ese espíritu le ha convertido en pionero de un nuevo estilo de literatura científica. En 2011, Cambridge University Press publicó su correspondencia con científicos de todo el mundo en un tomo de más de 600 páginas titulado *Coming of age with quantum information* («Llegando a la mayoría de edad con la información cuántica»). Al tiempo que relata los orígenes del bayesianismo cuántico, el libro deja entrever que los físicos teóricos son personas reales y de fuerte carácter, muy distintas de las criaturas bidimensionales que nos muestra la Wikipedia. La obra también documenta que, al contrario de lo que ocurre con la mayoría de los científicos, Fuchs se halla convencido de la importancia de la filosofía. No solo por la manera en que esta influye en la física, sino también por el modo en que evoluciona —o debería— gracias a los conceptos físicos.

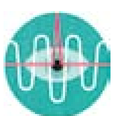
PROBABILIDADES POSIBLES

Ese vínculo con la filosofía se hace patente cuando advertimos que el bayesianismo cuántico nos obliga a reconsiderar la noción de probabilidad. En cierto sentido, la probabilidad se parece al tiempo: sabemos lo que es, hasta que se nos pide que lo definamos. Al arrojar una moneda al aire, nadie ignora que la expresión «una probabilidad del 50 por ciento de obtener una cara» guarda alguna relación con lo que ocurrirá cuando efectuemos 100 lanzamientos. Sin embargo, no queda muy claro de cuánto nos sirve dicha intuición a la hora de definir el significado de una proposición como «la probabilidad de que llueva esta tarde es del 60 por ciento», o el hecho de que, antes de

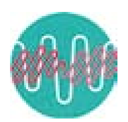
ANNA-KAISA JORMANAINEN

Cuatro interpretaciones de la mecánica cuántica

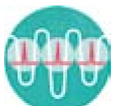
¿Qué sucede realmente en el mundo cuántico? Con el paso de los años, los físicos han propuesto más de una docena de interpretaciones muy distintas del formalismo matemático que rige la mecánica cuántica. Estas cuatro se encuentran entre las más populares.



INTERPRETACIÓN DE COPENHAGUE. Desarrollada principalmente por Werner Heisenberg y Niels Bohr, proporciona la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica. Las propiedades medibles de un sistema quedan codificadas en su estado cuántico. Matemáticamente, este puede representarse con una matriz o bien mediante una función de onda (un «mapa de posibilidades»). La conexión con el experimento llega de la mano de la regla de Born, la cual prescribe cómo obtener probabilidades medibles a partir del estado cuántico. Cuando se produce una medida, la teoría postula que el estado cuántico «colapsa» hacia un nuevo estado (uno asociado con el resultado obtenido en el experimento). Un colapso instantáneo, sin embargo, parece indicar que ciertos efectos se propagarían más rápido que la luz.



ONDA GUÍA. Varios físicos —incluido Albert Einstein durante unos años— se han propuesto reescribir el aparato matemático de la mecánica cuántica para que incluya un campo físico real que guiaría el movimiento de la partícula. Sin embargo, este formalismo se torna problemático cuando intenta describir la dinámica de varias partículas. Su principal dificultad reside en el hecho de que la onda-guía ejerce una acción a distancia, lo que implica que los efectos físicos se transmiten de forma instantánea a regiones muy alejadas.



MUCHOS MUNDOS. La forma más directa de evitar el problema asociado al colapso de la función de onda consiste en eliminarlo. La interpretación de muchos mundos postula que el estado cuántico del universo se desdobla una y otra vez de forma suave y predecible. Cuando se realiza un experimento para averiguar qué camino ha tomado un electrón, por ejemplo, ese estado cuántico no «colapsa» hacia una de las múltiples posibilidades; en su lugar, el mundo se dividiría en varias ramas. Nosotros nos encontraríamos en una de ellas y seríamos completamente ignorantes de las demás. Los principales escollos de esta interpretación —aparte del descomunal esfuerzo imaginativo que exige— residen en su fracaso a la hora de decidir qué «mediciones» provocan esas ramificaciones, así como en las dificultades para justificar la regla de Born.



COLAPSO ESPONTÁNEO. En lugar de eliminarlo, estas teorías postulan que el colapso de la función de onda sucede de manera natural. Aunque puede afectar de manera espontánea a cualquier sistema cuántico, su efecto resulta más notorio en la interacción con los objetos macroscópicos. Sin embargo, la teoría necesita incorporar un mecanismo nuevo que dé cuenta del colapso de la función de onda. Y, mientras no pueda verificarse experimentalmente, dicho mecanismo constituye un axioma adicional tan misterioso como el del colapso inducido por el observador.

que la operación contra Bin Laden se hubiese producido, Barack Obama estimase las probabilidades de éxito frente a las de fracaso en un 55/45.

A lo largo de los últimos tres siglos se han desarrollado dos nociones de probabilidad, cada una de ellas con numerosas variantes. La opción moderna y ortodoxa, la probabilidad frecuentista, define la probabilidad de un suceso como su frecuencia relativa en una serie de situaciones idénticas. Ese número pretende ser objetivo, verificable y aplicable a los experimentos científicos. El ejemplo típico nos lo proporciona el lanzamiento de una moneda. Si lo repetimos un gran número de veces, en casi la mitad de ellas saldrá cara, por lo que la probabilidad de obtener una cara será aproximadamente igual a 1/2. (Para evitar la ambigüedad que conllevan las expresiones como «un gran número de veces», «casi» o «aproximadamente», la definición se asocia al límite en el que realizamos un número infinito de lanzamientos, en cuyo caso la probabilidad toma exactamente el valor 1/2. Por desgracia, dicho valor resulta inverificable, con lo que pierde su pretensión de objetividad.) Al aplicar la misma definición al pronóstico meteorológico, tal vez podamos contar sucesos climáticos, sean estos reales o simulados. Pero, en el caso de la corazonada de Obama, la interpretación frecuentista es inútil: la operación contra Bin Laden solo podía ejecutarse una vez.

El punto de vista más antiguo, la probabilidad bayesiana, recibe su nombre de Thomas Bayes, clérigo del siglo XVIII cuyas ideas serían más tarde perfeccionadas por Pierre-Simon Laplace. Al contrario que la interpretación frecuentista, la probabilidad bayesiana es subjetiva por definición: proporciona una medida del grado de *confianza* que depositamos en un suceso. Puede entenderse como una medida numérica de cuánto estaríamos dispuestos a apostar a que dicho suceso tendrá lugar. En casos sencillos, como el lanzamiento de una moneda, las probabilidades frecuentista y bayesiana coinciden. Sin embargo, cuando se trata de predecir el tiempo o el resultado de una operación militar, el enfoque bayesiano permite combinar la información estadística cuantitativa con las estimaciones intuitivas basadas en nuestra experiencia previa [*véase* «Thomas Bayes y las sutilezas de la estadística», por Marc Dressler; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2013].

La interpretación bayesiana puede manejar con facilidad los sucesos que solo ocurren una vez (sobre los cuales la definición frecuentista no puede decir nada) y evita las dificultades de los infinitos. Sin embargo, su verdadero poder es otro. En ella, la asignación de probabilidades puede cambiar, ya que un grado de confianza no es algo fijo. Un meteorólogo frecuentista no tendrá ningún problema en predecir el tiempo en una región cuyo clima ha permanecido estable durante años. Sin embargo, si sobreviniese un cambio brusco, como una sequía inusitada, un meteorólogo bayesiano se encontraría mejor equipado para dar cuenta de la nueva información y del estado del tiempo.

El enfoque bayesiano descansa sobre una fórmula, la regla de Bayes, la cual nos permite calcular el efecto que ejerce la nueva información en la estimación de las probabilidades. Si, por ejemplo, se sospecha que un paciente tiene cáncer, el oncólogo comenzará por asignar una probabilidad inicial a la enfermedad, llamada probabilidad a priori. Esta se basará en datos como la incidencia de ese tipo de cáncer en la población, el historial clínico del individuo y otros factores. Sin embargo, cuando reciba los resultados de las primeras pruebas, el médico actualizará dicha probabilidad inicial; para ello, usará el teorema de Bayes. Ese nuevo número reflejará, ni más ni menos, las convicciones personales del facultativo.

La mayoría de los físicos optan por el enfoque frecuentista porque han sido educados para rehuir la subjetividad. Pero cuando se trata de efectuar predicciones, el punto de vista bayesiano es el imperante, explica Marcus Appleby, matemático de la Universidad de Londres. Este investigador concede a Fuchs el mérito de haberle convencido de la importancia de las probabilidades bayesianas.

Por más que el enfoque frecuentista nos diga que los resultados pasados no influyen en las probabilidades futuras, Appleby señala que nadie en sus cabales aceptaría jugar a una lotería si se enterarse de que, durante los últimos diez años, el premio ha venido recayendo siempre sobre la misma persona. En la práctica, de hecho, nadie ignoraría los resultados de las últimas semanas. El sentido común nos empuja a usar el punto de vista bayesiano, actualizar nuestras creencias y actuar en consecuencia basándonos en los indicios previos de los que disponemos.

REESCRIBIR LAS LEYES CUÁNTICAS

Aunque el bayesianismo cuántico niega la realidad de la función de onda, Schack explica que no se trata de una teoría nihilista que niegue la realidad: según ella, el sistema cuántico que examina un observador es muy real. Mermin opina que, desde un punto de vista filosófico, el bayesianismo cuántico sugiere una división entre el mundo en el que vive el observador y la experiencia que este tiene de ese mundo. Esta última quedaría descrita por la función de onda.

Un hallazgo reciente de Fuchs podría ayudar a cimentar el bayesianismo cuántico como una interpretación válida de la probabilidad y de la mecánica cuántica. El descubrimiento guarda relación con la regla de Born, la fórmula empírica que nos dice cómo calcular la probabilidad de un suceso a partir de la función de onda. (En términos técnicos, dicha regla dicta que la probabilidad de encontrar un sistema en el estado X viene dada por el cuadrado del módulo de la función de onda asignada a X.) Fuchs ha demostrado que este principio puede reescribirse casi por completo usando el lenguaje de la teoría de la probabilidad; es decir, sin hacer referencia a la función de onda. La regla de Born constituye el nexo entre la función de onda y los resultados experimentales. Ahora, Fuchs ha demostrado que los resultados de los experimentos pueden predecirse sin usar más que probabilidades.

Para Fuchs, la nueva expresión de la regla de Born proporciona otro indicio de que la función de onda no constituye más que una herramienta que permite a un observador calcular sus expectativas, o probabilidades, sobre el mundo cuántico que le rodea. «Desde este punto de vista, la regla de Born supone una ampliación de la inferencia bayesiana; no en el sentido de proporcionar probabilidades más objetivas, sino en el de aportar reglas adicionales para guiar el comportamiento de un agente cuando interacciona con el mundo físico», explica.

La nueva ecuación goza de una simplicidad sorprendente. Excepto por un pequeño detalle, tiene el mismo aspecto que la ley de la probabilidad total: el requerimiento de que la suma de las probabilidades asociadas a todos los resultados posibles sea 1. (En el caso de una moneda, la probabilidad de obtener cara es 1/2 y la de obtener cruz también, de modo que su suma vale 1.) El detalle inusual —y la única referencia a la mecánica cuántica en este formalismo— es que en dicha ecuación aparece la dimensión d del sistema cuántico. Aquí, el concepto no hace referencia a las dimensiones espaciales, como la longitud o el grosor, sino al número de estados que puede ocupar el sistema cuántico. Por ejemplo, un electrón cuyo espín puede apuntar hacia arriba o hacia abajo constituiría un sistema de dimensión $d = 2$.

Fuchs señala que, del mismo modo en que la masa de un objeto determina sus propiedades gravitatorias e inerciales, la dimensión cuántica d supondría una propiedad intrínseca e irreducible que caracterizaría la «naturaleza cuántica» de un sistema. Aunque d se halla implícito en todos los cálculos de la mecánica cuántica, el hecho de que aparezca de forma explicita en una ecuación fundamental es algo nuevo. Fuchs espera que esta nueva formulación de la regla de Born allane el camino para entender la mecánica cuántica desde otra perspectiva: «Juego con la idea de que la regla de Born constituya el axioma más importante de toda la teoría cuántica», confiesa.

UNA NUEVA REALIDAD

Uno de los defectos que se achacan al bayesianismo cuántico es su incapacidad para explicar los fenómenos macroscópicos complejos en términos de otros microscópicos y más primitivos, como hace la mecánica cuántica tradicional. Ese problema podría solucionarse si el bayesianismo cuántico lograse su declarada intención de reconstruir la teoría estándar a partir de una serie de axiomas nuevos y convincentes.

Dicha meta está aún por alcanzar. Sin embargo, el bayesianismo cuántico ofrece una nueva imagen de la realidad física. Al interpretar la función de onda en términos de expectativas personales, proporciona un significado matemático preciso a la afirmación de Bohr de que la tarea de la física no consiste en averiguar cómo *es* la naturaleza, sino en investigar lo que podemos *decir* sobre ella. Los partidarios del bayesianismo cuántico sostienen que, hasta que no realizamos un experimento, el resultado simplemente no existe.

Antes de medir la posición o la velocidad de un electrón, este no posee ninguno de esos atributos. Es el experimento lo que hace emerger dicha propiedad. En palabras de Fuchs: «Con cada medida realizada por un experimentador a su libre albedrío, el mundo se va perfilando poco a poco, pues participa en una especie de alumbramiento». De alguna manera, ello nos convierte en agentes activos en la continua creación del universo.

PARA SABER MÁS

Quantum probabilities as Bayesian probabilities. C. M. Caves, C. A. Fuchs y R. Schack en *Physical Review A*, vol. 65, 022305, enero de 2002. Disponible **arxiv.org/abs/quant-ph/0106133.**

QBism, the perimeter of quantum Bayesianism. C. A. Fuchs, marzo de 2010. Disponible en **arxiv.org/abs/1003.5209**.

Interview with a quantum Bayesian. C. A. Fuchs, julio de 2012. Disponible en **arxiv.org/abs/1207.2141.**

Quantum mechanics: Fixing the shifty split. N. David Mermin en *Physics Today*, vol. 65, n.º 7, pág. 8, julio de 2012.

NEUROCIENCIA

Romper la barrera cerebral

Una nueva concepción de la barrera hematoencefálica como un órgano vivo y mutable puede revolucionar el tratamiento de enfermedades como el cáncer y el alzhéimer

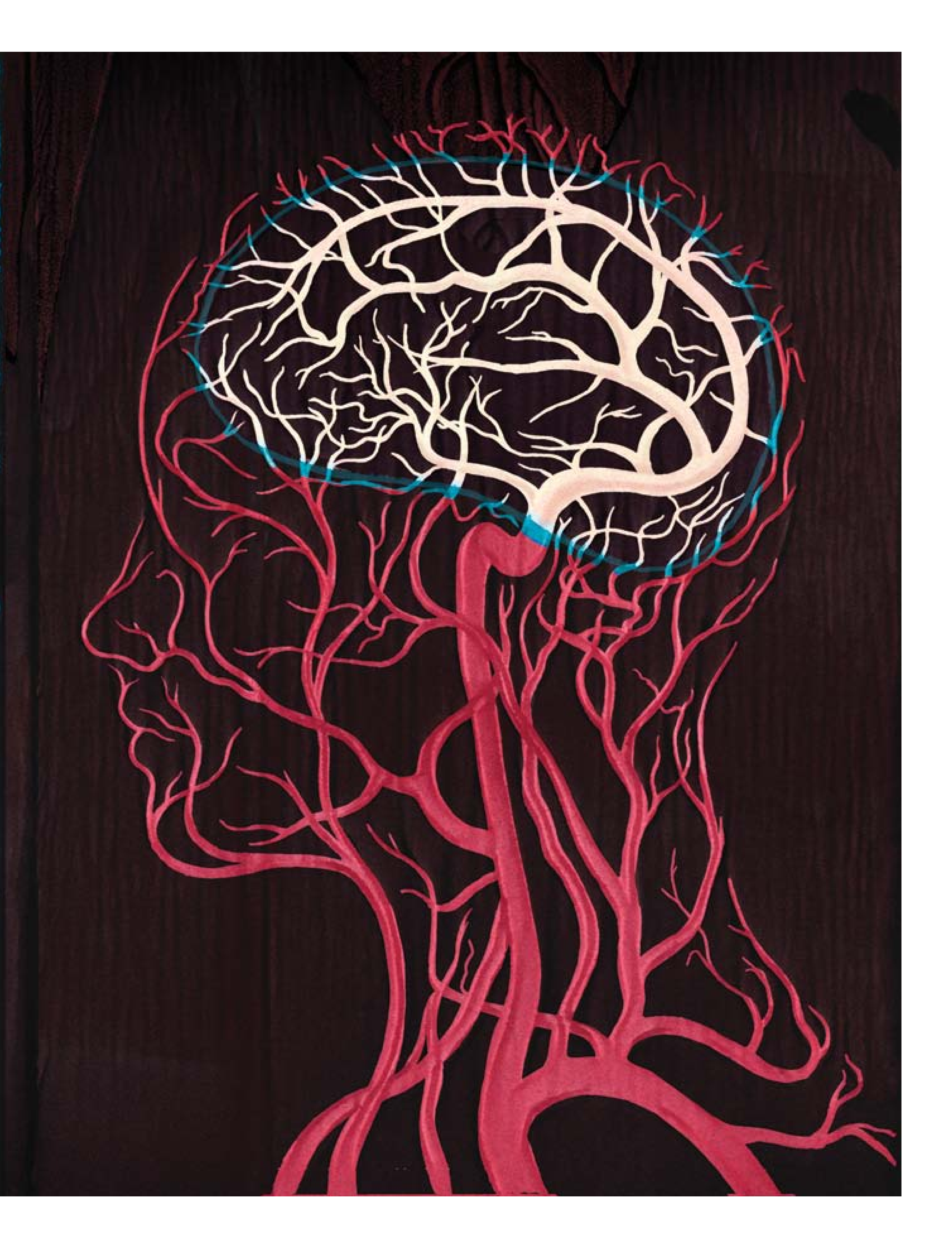
Jeneen Interlandi

A finales de 1800, mientras Paul Ehrlich realizaba uno de sus famosos experimentos de tinción (como el que le llevaría a descubrir una cura para la sífilis y a ser merecedor del premio Nobel en medicina), se tropezaría con un enigma que se prolongaría hasta nuestros días. Tras inyectar tinta en el torrente sanguíneo de un ratón, esta penetró en todos los órganos excepto en el cerebro. En el microscopio observó cómo los riñones, el hígado y el corazón cambiaban, de forma clara y bien delimitada, a un color azul púrpura oscuro, mientras que el cerebro mantenía un tono amarillo blanquecino. Cuando uno de sus estudiantes inyectó la misma tinta directamente al cerebro, sucedió lo contrario: el cerebro se volvió azul, pero ninguno de los otros órganos varió de color. El estudiante pensó que sin duda existiría una barrera entre el cerebro y la sangre.

Debió transcurrir más de medio siglo y utilizarse un microscopio 5000 veces más potente que el empleado por Ehrlich para poder localizar la barrera oculta en los vasos sanguíneos del cerebro. El cerebro humano contiene en promedio unos 600 kilómetros de dichos vasos, los cuales se doblan y tuercen en un sinfín de bucles enmarañados para irrigar cada una de los 100.000 millones de neuronas que lo forman. Las paredes de los vasos de todo el cuerpo están recubiertas por células endoteliales, pero en el cerebro se hallan mucho más juntas que en ningún otro lugar. De ahí que ni la tinción de Ehrlich ni la mayoría de los medicamentos que existían por entonces pudieran pasar del torrente sanguíneo al cerebro.

Mucho antes de poder visualizarla, los médicos la veneraban o trataban de evitarla. «Durante siglos la hemos visto como un muro», dice Lester Drewes, biólogo vascular de la Universidad de Minnesota y especialista en la barrera hematoencefálica. De común acuerdo, se aceptaba que estaba allí por alguna razón que no debía cuestionarse.

ALEX NABAUM



Pero esa idea ha cambiado. Hoy se sabe que el muro encierra en realidad una enorme actividad. Las células de ambos lados (sangre y cerebro) se comunican sin cesar y se influyen mutuamente. Y no solo eso, sino que una amplia gama de vías moleculares presentes en la membrana endotelial regulan el tráfico, al inhibir la entrada de algunas sustancias y facilitar la de otras. Incluso los leucocitos, durante largo tiempo considerados demasiado voluminosos para traspasar la barrera, la atraviesan con regularidad para controlar posibles invasores.

Los científicos han adoptado el término «unidad neurovascular» para describir mejor lo que observan. No solo se trata de una pared de células endoteliales, sino de un órgano vital formado por numerosos tipos de células, incluidas las que rodean los vasos, que desempeña una función esencial en el desarrollo, el envejecimiento y la enfermedad. La gran revolución en microscopía ha permitido observar este órgano de manera más detallada y clara que nunca.

BARRERAS ROTAS

Las imágenes del microscopio de «dos fotones» empleado por Maiken Nedergaard, de la Universidad de Rochester, resultan infinitamente más fascinantes que lo que Ehrlich hubiera imaginado jamás. La gran diferencia entre la observación de Ehrlich y la de Nedergaard radica en que la segunda utiliza el cerebro de un animal vivo (ratón). Tras eliminar una pequeña parte del cráneo del múrido, la investigadora le inyecta tinta a su circulación, con lo que puede observar la barrera hematoencefálica en tiempo real: las células la traspasan por sí solas a través de las paredes de los capilares sanguíneos, formadas por una única capa de células endoteliales. El momento es impresionante de presenciar, más si se tiene en cuenta lo inescrutable que resultaba la barrera cuando Nedergaard inició su carrera, hace unos 20 años.

Antes de la llegada del microscopio de dos fotones (una técnica avanzada que permite obtener imágenes de las 300 micras superficiales de la corteza), los investigadores no pudieron averiguar mucho más que Ehrlich, pues estudiaban tejido muerto fijado a portaobjetos tradicionales. Según Nedergaard, ese tipo de experimentos ofrecían escasa información sobre el modo en que opera la barrera hematoencefálica. Ello se debe a que la circulación sanguínea resulta fundamental para el funcionamiento del cerebro y la barrera, un hecho que ha sorprendido y fascinado a los que estudian este sistema.

En una serie de experimentos recientes, Nedergaard ha demostrado que la estimulación de un grupo determinado de neuronas produce un aumento en el diámetro de los vasos sanguíneos circundantes, lo que ofrece un mayor aporte de sangre y nutrientes a las neuronas justo en el momento en que estas empiezan a emitir impulsos nerviosos. A medida que la estimulación se hace más lenta, los vasos se contraen y la entrega de nutrientes disminuye. Se trata de un proceso muy dinámico.

Jeneen Interlandi es periodista científica. Durante el último año ha gozado de una beca Nieman para estudiar la historia de la ciencia y de la medicina en la Universidad Harvard.



Pero también reviste una enorme complejidad. Los capilares se hallan enlazados con los astrocitos y los pericitos. Estas células envuelven todo el sistema vascular y parecen facilitar la comunicación entre la sangre, el endotelio y las neuronas; a su vez, el conjunto está rodeado por otras células.

Entre ellas, a Nedergaard le llaman especial atención las células microgliales, los macrófagos que constituyen la línea de defensa del sistema nervioso central. La microglía protege el cerebro y la médula espinal de células dañinas y de agentes infecciosos. El mal funcionamiento de la microglía se asocia a una amplia gama de enfermedades neurodegenerativas, desde el alzhéimer hasta el párkinson. De ahí que Nedergaard sospeche que su papel en dichas patologías tiene que ver con una alteración en la permeabilidad de la barrera hematoencefálica.

El científico argumenta que cada vez que una célula endotelial muere, ya sea de forma natural o debido a una lesión, su pérdida deja una apertura transitoria en la barrera. Esta no sería reparada con suficiente prontitud por las células endoteliales supervivientes, al hallarse agregadas todas ellas mediante enlaces conocidos como uniones estrechas. La presencia de tales vínculos significaría que en los cerebros sanos debe de actuar otro tipo de células para cerrar las brechas. En una secuencia de experimentos, Nedergaard empleó un láser para romper los capilares del cerebro en ratones vivos. En entre 10 y 20 minutos, las células microgliales habían rodeado por completo el área dañada. Habían envuelto el capilar a una velocidad sorprendente.

Su equipo está ahora intentando determinar si las células microgliales constituyen, de hecho, la primera línea de defensa, es decir, la unidad de emergencia que acude para cerrar temporalmente la barrera endotelial dañada hasta que las propias células puedan ser reparadas o reemplazadas. Cabe imaginar entonces, dice Nedergaard, que cuando las células microgliales no funcionan de modo adecuado, las pequeñas roturas no se reparan con la suficiente rapidez y ello lleva a la neurodegeneración. Su hipótesis es solo una de las muchas que los científicos están comprobando para entender la función de la barrera hematoencefálica en las enfermedades.

Tomemos como ejemplo la esclerosis múltiple, un trastorno caracterizado por episodios de dolor muscular debilitante, entumecimiento y problemas de visión. Los médicos saben desde hace tiempo que la enfermedad está causada por la descom-

EN SÍNTESIS

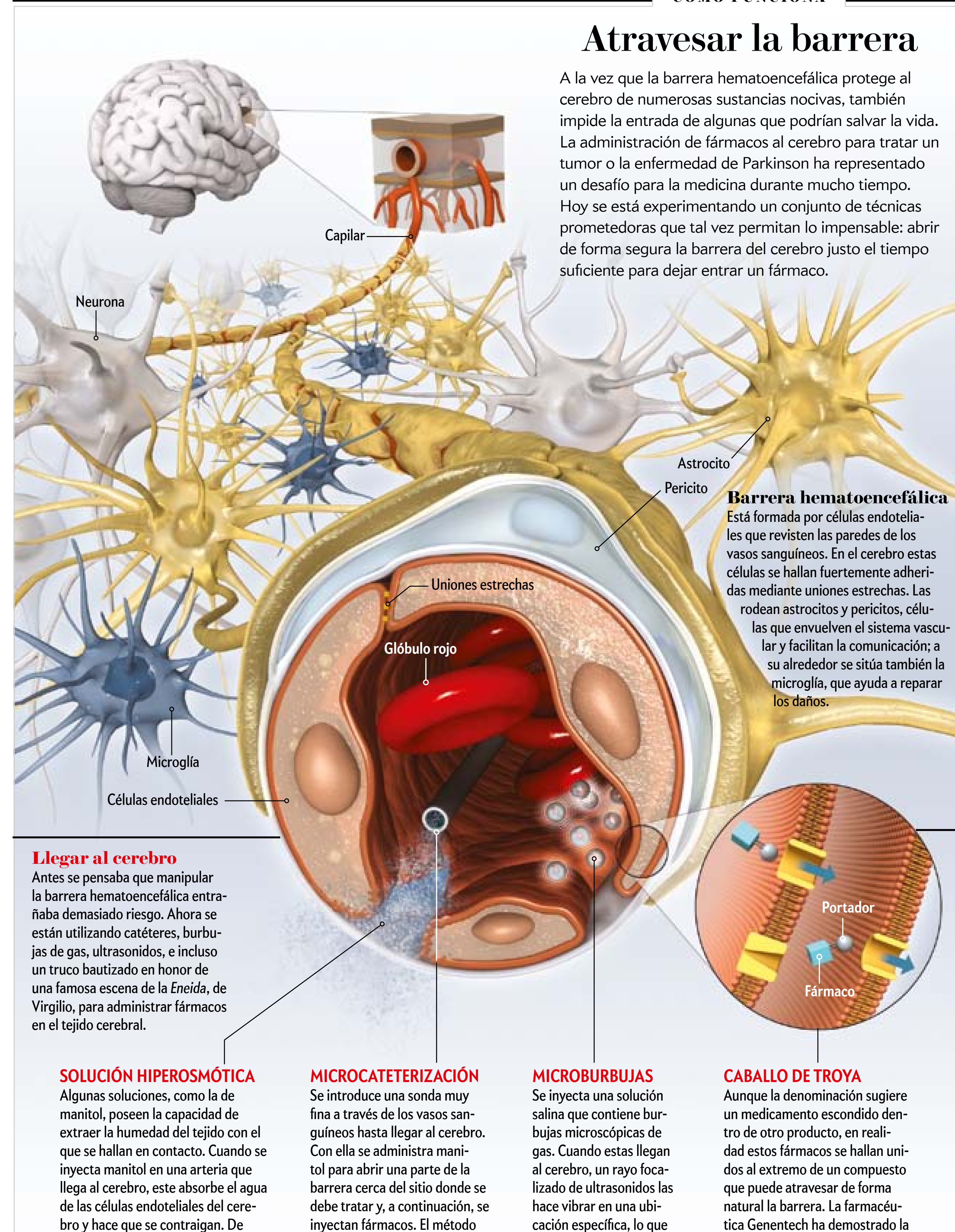
Durante más de un siglo se había pensado que la barrera hematoencefálica constituía un muro infranqueable. En realidad está compuesta por vasos sanguíneos normales con una propiedad extraordinaria: las células que forman su pared se hallan tan unidas que solo dejan pasar unas pocas sustancias al cerebro.

La barrera es un órgano vital, con una intensa actividad, donde las células se comunican entre sí para decidir a qué moléculas permiten el paso y cuáles no. Existen muchas más células que atraviesan la barrera de lo que se pensaba.

Para reflejar este nuevo enfoque, los expertos han definido la barrera hematoencefálica como una unidad neurovascular. Muchos creen que aprender el modo de abrirla y cerrarla representa la clave que llevará a curar múltiples enfermedades.

Atravesar la barrera

A la vez que la barrera hematoencefálica protege al cerebro de numerosas sustancias nocivas, también impide la entrada de algunas que podrían salvar la vida. La administración de fármacos al cerebro para tratar un tumor o la enfermedad de Parkinson ha representado un desafío para la medicina durante mucho tiempo. Hoy se está experimentando un conjunto de técnicas prometedoras que tal vez permitan lo impensable: abrir de forma segura la barrera del cerebro justo el tiempo suficiente para dejar entrar un fármaco.



Barrera hematoencefálica
Está formada por células endoteliales que revisten las paredes de los vasos sanguíneos. En el cerebro estas células se hallan fuertemente adheridas mediante uniones estrechas. Las rodean astrocitos y pericitos, células que envuelven el sistema vascular y facilitan la comunicación; a su alrededor se sitúa también la microglía, que ayuda a reparar los daños.

Llegar al cerebro

Antes se pensaba que manipular la barrera hematoencefálica entrañaba demasiado riesgo. Ahora se están utilizando catéteres, burbujas de gas, ultrasonidos, e incluso un truco bautizado en honor de una famosa escena de la *Eneida*, de Virgilio, para administrar fármacos en el tejido cerebral.

SOLUCIÓN HIPEROSMÓTICA

Algunas soluciones, como la de manitol, poseen la capacidad de extraer la humedad del tejido con el que se hallan en contacto. Cuando se inyecta manitol en una arteria que llega al cerebro, este absorbe el agua de las células endoteliales del cerebro y hace que se contraigan. De este modo, las uniones estrechas se abren y los medicamentos pueden atravesar la barrera.

MICROCATETERIZACIÓN

Se introduce una sonda muy fina a través de los vasos sanguíneos hasta llegar al cerebro. Con ella se administra manitol para abrir una parte de la barrera cerca del sitio donde se debe tratar y, a continuación, se inyectan fármacos. El método ya se utiliza para la administración de anticoagulantes después de una apoplejía.

MICROBURBUJAS

Se inyecta una solución salina que contiene burbujas microscópicas de gas. Cuando estas llegan al cerebro, un rayo focalizado de ultrasonidos las hace vibrar en una ubicación específica, lo que provoca la apertura de la barrera y permite la entrada de los fármacos.

CABALLO DE TROYA

Aunque la denominación sugiere un medicamento escondido dentro de otro producto, en realidad estos fármacos se hallan unidos al extremo de un compuesto que puede atravesar de forma natural la barrera. La farmacéutica Genentech ha demostrado la eficacia de la técnica en ratones, pero los ensayos con humanos todavía tardarán.

EMILY COOPER

posición de la mielina, una vaina elástica que envuelve y aísla los axones (los «cables» emisores de señales cerebrales) de las neuronas. Pero el motivo por el que los brotes aparecen en episodios y el factor que los desencadena siguen siendo un misterio. Una lista creciente de estudios con imágenes de resonancia magnética sugiere que el daño en la barrera hematoencefálica precipita los brotes de esclerosis múltiple. Estas aperturas anómalas permiten que un exceso de leucocitos pasen de los capilares al cerebro y degraden la mielina. Algunos estudios recientes hacen pensar que las moléculas de oxígeno muy reactivas atacan la barrera y con ello la debilitan; los antioxidantes, que neutralizan los efectos de las moléculas reactivas, pueden servir, por tanto, como estabilizadores de la barrera. Derwes señala que la esclerosis múltiple siempre se había considerado una enfermedad del sistema inmunitario. Ahora empezamos a pensar en ella como una alteración de la barrera hematoencefálica.

Lo mismo parece suceder en la epilepsia. Los médicos y los científicos sabían desde hace tiempo que las convulsiones correspondían a perturbaciones transitorias de la barrera, pero hasta hace poco se pensaba que esas brechas eran una consecuencia de las convulsiones y no una causa. Ahora este punto de vista ha empezado a cambiar. Investigadores de la Universidad de Ámsterdam han descubierto que la alteración artificial de la barrera en ratas representa una manera segura de aumentar el número de convulsiones que sufren y que, además, cuanto mayor sea la alteración de la barrera, mayor probabilidad habrá de que el animal desarrolle epilepsia del lóbulo temporal. Estudios realizados en la Clínica Cleveland con cerdos (modelo experimental) y con humanos (modelo observacional) demuestran también que las crisis epilépticas ocurren después, y no antes, de que la barrera se vea alterada.

La reparación de brechas en la barrera constituye solo la mitad del problema por resolver. La otra mitad consiste en crear aberturas para que los medicamentos de interés puedan atravesarla

Otros científicos han identificado dos proteínas de la barrera cuya disfunción podría desempeñar un papel en el alzhéimer. Una de ellas (RAGE) facilita el transporte de la molécula amiloide beta desde la sangre hasta el cerebro, mientras que la otra (LRP1) permite su salida. Cuando se produce un desequilibrio entre ambas proteínas (si entra un exceso de amiloide beta en el cerebro o apenas se expulsa de él), surgen las placas cerebrales asociadas a la enfermedad. A pesar de que las aplicaciones clínicas quedan aún lejos, el hallazgo ha dado al menos motivos para la esperanza: en experimentos con ratones se ha logrado impedir la acumulación de amiloide beta mediante la desactivación del gen que da lugar a la proteína RAGE en las células endoteliales. Cabe la posibilidad, entonces, de que los fármacos inhibidores de RAGE consigan el mismo objetivo en los humanos.

Por supuesto, la reparación de roturas en la barrera constituye solo la mitad del problema por resolver. La otra mitad consiste en crear aberturas de forma deliberada para que los medicamentos de interés puedan cruzarla. Hasta ahora, los médicos han descubierto al menos una manera de hacerlo, pero el objetivo es hallar el mayor número posible de ellas.

ÁBRETE, SÉSAMO

A pesar de toda esa complejidad, el tráfico entre el torrente sanguíneo y el cerebro se rige por una serie de normas muy simples. Para poder penetrar en el cerebro, un compuesto debe presentar un tamaño inferior a 500 kilodaltons (como la mayoría de los antidepresivos, antipsicóticos y fármacos contra el insomnio), tener la capacidad de utilizar una de las vías naturales integradas en la propia barrera (como la L-dopa, fármaco usado en el párkinson) o ser liposoluble, es decir, poseer afinidad por los lípidos para poder unirse y deslizarse a través de la membrana celular lipídica (como el alcohol, la cocaína o la heroína). Según la mayoría de las estimaciones, el 98 por ciento de los medicamentos no cumplen con ninguno de estos criterios, lo que significa que cruzan la barrera en cantidades tan minúsculas que resultan médicamente inútiles, o ni siquiera llegan a cruzarla.

Se han realizado numerosos esfuerzos para sacar provecho de esos principios. Por ejemplo, se han fabricado fármacos más liposolubles para que atravesaran la barrera hematoencefálica con relativa facilidad, pero pronto se descubrió que esta estrategia conllevaba varias desventajas. Algunos medicamentos cruzaban la barrera pero eran expulsados con rapidez, mientras que otros se quedaban atrapados en la membrana celular y no podían ejercer su efecto. Entretanto, todos ellos penetraban en el resto de órganos del cuerpo con una falta de discriminación alarmante.

Edward A. Neuwelt, médico residente desde hace más de 30 años, emprendió un camino diferente. Como neurocirujano y director del Programa sobre la Barrera Hematoencefálica de la Universidad de Ciencias de la Salud de Oregón (UCSO), desarrolló el primer procedimiento quirúrgico para romper la barrera. Primero, inyecta una solución de manitol en una arteria que conduce al cerebro. Debido a que la solución es hiperosmótica (contiene más soluto que las células endoteliales del cerebro), absorbe el agua de las células y hace que se arruguen como los dedos empapados en agua durante algún tiempo. Esta contracción hace que se rompan las uniones estrechas y aparezcan huecos lo bastante grandes como para que los fármacos (administrados por la misma arteria) puedan introducirse. Entre 40 minutos y dos horas más tarde, las células endoteliales recuperan su tamaño normal y vuelven a formar las uniones estrechas que sellan la barrera otra vez.

Durante casi dos décadas Neuwelt ha venido utilizando esta técnica para forzar la apertura de la barrera hematoencefálica en un tipo de pacientes muy específico: los que presentan tumores cerebrales y que podrían responder a la quimioterapia solo si los fármacos lograran alcanzar el cerebro.

Uno de estos pacientes fue Joanie Lafferty, de 57 años de edad, a quien se le diagnosticó un linfoma del sistema nervioso central en 2007 (un cáncer que empieza en el sistema linfático y se extiende por todo el cerebro). Los médicos le dieron un mes de vida. Cuando llegó por primera vez a UCSO, dos semanas después de la primera biopsia cerebral, la parte derecha de su cuerpo se hallaba paralizada. Su compañía de seguros le advirtió que el procedimiento aún estaba en fase experimental y podría provocarle un derrame cerebral, epilepsia o algún mal peor. Pero tal y como Lafferty lo concebía, no tenía nada que perder. «Se trataba de la única opción que había encima de la mesa. Y yo quería vivir.»

Solo unas semanas después de haber sido diagnosticada, Lafferty dejó que Neuwelt y su equipo le introdujeran un catéter a través de la ingle, hasta la arteria carótida izquierda, para poder administrarle dos soluciones: el manitol hiperosmótico seguido de inmediato por metotrexato para la quimioterapia. Al día siguiente se le aplicó el mismo procedimiento en la carótida derecha. Un mes más tarde, y cada mes durante un año, se le repitió la operación: primero a través de su arteria izquierda y a continuación la derecha, el manitol forzaba la apertura de la barrera hematoencefálica y el metotrexato podía introducirse en el cerebro y atacar el tumor. Al final del segundo tratamiento, salió del hospital sin silla de ruedas. Dos meses más tarde, la enfermedad había remitido por completo. Hoy, después de cinco años, Lafferty sigue viviendo sin ella.

Para pacientes menores de 60 años, el equipo de Neuwelt cuenta con una media de supervivencia de 13 a 14 años, con un mejor estado cognitivo, en comparación con el tratamiento estándar de radiación cerebral general. Por supuesto, no todos los fármacos contra el cáncer pueden administrarse a través de la barrera y no todos los tumores cerebrales pueden tratarse de esta manera. Hasta ahora tan solo algunos medicamentos han superado las pruebas de seguridad. Debido a que en el procedimiento el manitol introducido por la carótida se extiende por todo el cerebro, la mayor parte de la barrera se abre y aumenta el riesgo de inflamación del tejido, infección y toxicidad.

A pesar de que Neuwelt y su equipo trabajan para perfeccionar la técnica y ampliar su aplicabilidad, los médicos de otros lugares están desarrollando otras opciones. Una de las más prometedoras es la microcateterización directa. Igual que la estrategia de Neuwelt, este método consiste también en insertar un catéter en los vasos sanguíneos y administrar manitol para mantener la barrera abierta. Pero en lugar de detenerse en la carótida, el microcatéter llega directamente al cerebro y abre solo una pequeña parte de la barrera, la más cercana al lugar de la patología. «Es un procedimiento muy específico», dice John Boockvar, neurocirujano del centro médico Presbyterian Weill Cornell de Nueva York, que dirige el ensayo clínico.

Todavía está por ver si la técnica resulta ventajosa o no. Por un lado, la apertura de una menor parte de la barrera reduce el riesgo de inflamación del tejido y las convulsiones, por no mencionar la cantidad de tejido cerebral que se ve expuesto a los efectos tóxicos de la quimioterapia. Por otro lado, como señala Neuwelt, la especificidad local constituye una desventaja en el tratamiento de enfermedades de todo el cerebro, tales como el cáncer o incluso estadios avanzados de alzhéimer. Con el microcatéter solo puede atacarse el tumor que resulta visible. Pero, cuando se trata de tumores cerebrales, son precisamente los lugares afectados que no se ven los que terminan con la vida del paciente.

La microcateterización ya se utiliza de manera rutinaria para introducir anticoagulantes en el cerebro de pacientes con apoplejía; Boockvar y su equipo están comprobando su eficacia en la administración de diferentes medicamentos antitumorales. Con el tiempo, la técnica podría emplearse para combatir el párkinson o el alzhéimer y, en teoría, cualquier enfermedad cerebral para la que existan fármacos que necesiten ayuda para cruzar la barrera.

Otra estrategia para franquear la barrera se centra en el empleo de ultrasonidos y microburbujas (burbujas microscópicas de gas). Primero se inyecta en la sangre la solución salina que contiene microburbujas y, a continuación, se aplica un rayo de ultrasonido focalizado que provoca la vibración rápida de las burbujas. Como consecuencia, se abren las uniones estrechas de una ubicación específica y los fármacos inyectados en el torrente sanguíneo pueden penetrar en el cerebro. Pasado un tiempo, vuelven a formarse las uniones estrechas y la barrera se cierra. Investigadores de la Universidad Harvard, la Universidad de Columbia y otras instituciones están desarrollando microburbujas y ultrasonidos focalizados. La técnica ha demostrado ser segura en monos y pronto se someterá a ensayos clínicos con humanos.

Por supuesto, forzar la apertura de la barrera no representa la única manera de conseguir la entrada de los fármacos; otra táctica consiste en unirlos a compuestos que utilizan moléculas transportadoras de la barrera para atravesarla. Los científicos trabajan para desarrollar este tipo de fármacos y se refieren a ellos como «caballos de Troya», aunque el término resulta poco apropiado. El fármaco no se esconde dentro de un compuesto conocido, sino que se une a él. El método ha funcionado en algunos casos. Un caballo de Troya desarrollado por Genentech redujo un 47 por ciento las placas cerebrales en roedores de experimentación. El medicamento en cuestión llega al cerebro mediante los mismos receptores que transportan el hierro a través de la barrera. En la Universidad de California, en Los Ángeles, y en otros centros se están investigando sustancias semejantes (no solo para el alzhéimer, sino para otros trastornos neurodegenerativos). Con todas ellas se está avanzando, poco a poco, hacia un objetivo común: la evaluación en ensayos clínicos con humanos.

ALFA Y OMEGA

La demostración de la importancia de la barrera en el estudio de las enfermedades está dando paso al examen de su función en los procesos fundamentales del desarrollo y del envejecimiento, el principio y el final de la vida en sí. Los experimentos de los años veinte del siglo xx indicaban que los recién nacidos presentaban una barrera inmadura, una idea que todavía persiste hoy entre los biólogos del desarrollo y los investigadores de la barrera. Pero algunos estudios recientes han revelado que la formación de uniones estrechas se produce casi a la vez que los vasos sanguíneos comienzan a penetrar en el cerebro del embrión. De hecho, se ha empezado a sospechar que la barrera desempeña una función importante durante el desarrollo, al proporcionar al cerebro un ambiente interno especializado que permite a las neuronas crecer y conectarse entre sí.

Después, a medida que envejecemos, ese medio especializado empieza a alterarse. Se está comenzando a pensar que ligeros cambios en la barrera hematoencefálica (una reorganización de la vascularización cerebral o fugas pequeñas y lentas en ella) constituyen un camino hacia la neurodegeneración asociada a la edad. «Se trata de la siguiente cuestión que debemos abordar», dice Drewes, quien ha estado estudiando la barrera durante más de dos décadas. «Tal vez la lección más importante haya sido darse cuenta de lo poco que todavía sabemos.»

PARA SABER MÁS

Development of the blood-brain barrier: A historical point of view. Domenico Ribatti, Beatrice Nico, Enrico Crivellato y Marco Artico en *Anatomical Record*, Part B: *New Anatomy*, vol. 289, n.º 1, págs. 3-8, 2006.

Engaging neuroscience to advance translational research in brain barrier biology. Edward A. Neuwelt et al. en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 12, n.º 3, págs. 169-182, marzo de 2011.

Ultrasound Elasticity Imaging Laboratory at Columbia University. **http://orion.bme.columbia.edu/ueil/research.php**

por Esther Garcés y Sonia Quijano

Diversidad marina escondida

El número de especies se ha subestimado en el grupo de las diatomeas debido a la dificultad que entraña diferenciar una especie de otra

Las especies son unidades naturales fundamentales. Su delimitación adecuada constituye un requisito esencial para la evaluación de la biodiversidad y la comprensión de su ecología, la biogeografía, la historia evolutiva y los mecanismos de especiación.

Dentro de los eucariotas unicelulares del fitoplancton, las estimaciones de la diversidad biológica aún se basan principalmente en las características morfológicas. Pero los resultados de las evaluaciones taxonómicas moleculares que se han realizado en tiempo reciente sugieren que la diversidad del fitoplancton se ha subestimado en gran medida.

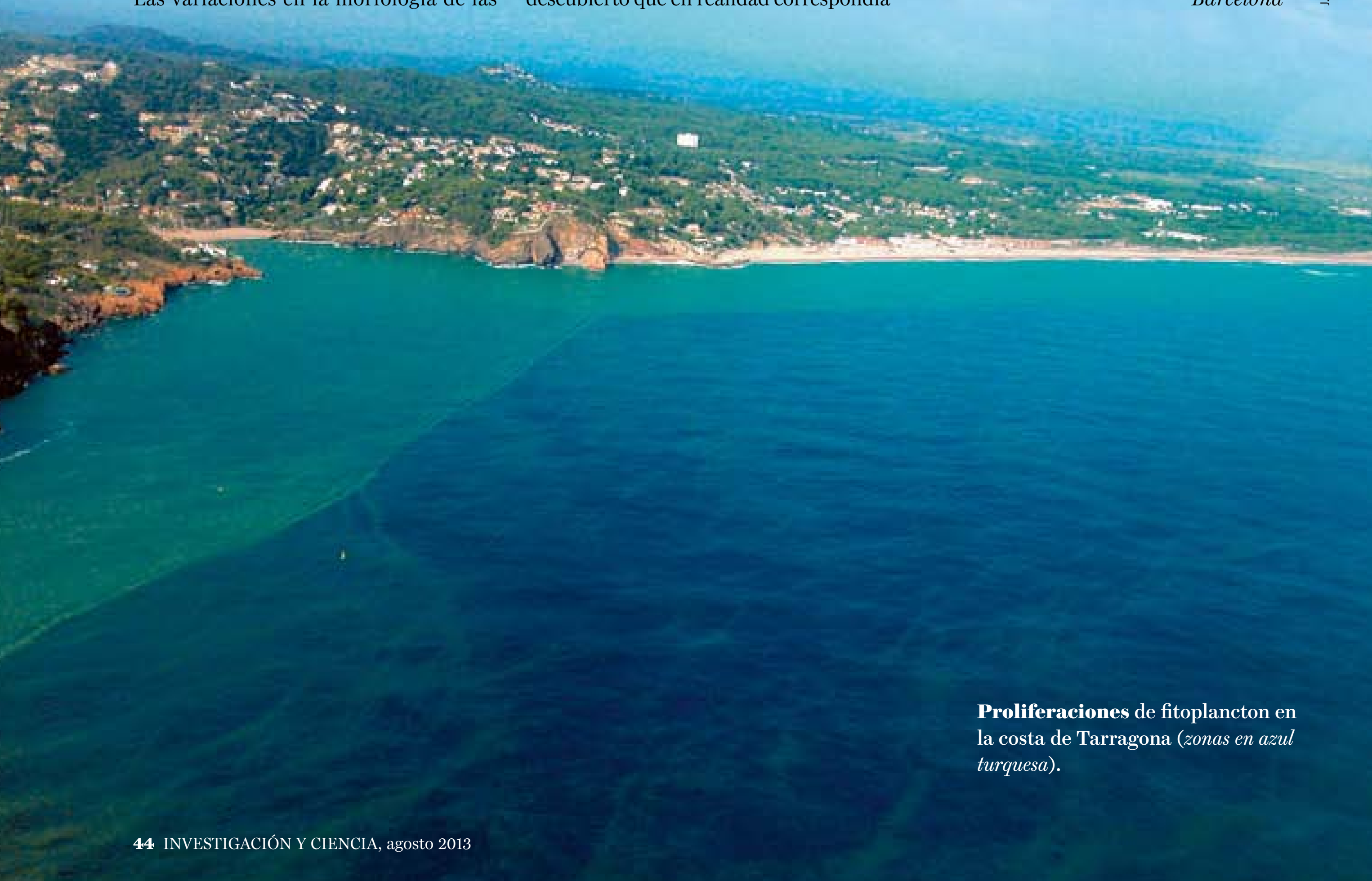
Las diatomeas corresponden al grupo de microalgas más abundante y diversificado; en el ambiente marino forman parte del fitoplancton. Se caracterizan por presentar una cubierta de sílice en forma de caja compuesta por dos valvas. Las variaciones en la morfología de las valvas permiten a veces identificar la especie en cuestión, pero con frecuencia no existen, o apenas existen, diferencias morfológicas entre una especie y otra. Se trata de organismos crípticos o semicrípticos, aislados reproductivamente pero difíciles o imposibles de distinguir en cuanto a sus caracteres morfológicos. Sin embargo, sí presentan una divergencia en el hábitat, la fisiología o los rasgos del ciclo de vida.

Para entender la diversidad del fitoplancton, resultan básicos el concepto biológico de especie (grupos que se cruzan entre sí y que se hallan aislados reproductivamente de otros) y el concepto filogenético, basado en la historia evolutiva (la especie pertenece a un grupo único con un linaje común).

En el género marino de diatomeas *Pseudo-nitzschia*, lo que se consideraba una sola especie, *P. delicatissima*, se ha descubierto que en realidad correspondía a un complejo de especies crípticas que no se distinguían morfológicamente. No obstante, el análisis filogenético indicaba que había al menos dos genotipos. Los experimentos de laboratorio realizados por nuestro grupo han demostrado que los individuos de uno de los dos clados logran entre sí una reproducción sexual exitosa. En cambio, los intentos realizados para que ambos clados se crucen han resultado infructuosos.

Los dos genotipos se encuentran en el mar Mediterráneo. Hemos concluido que los dos clados se hallan separados por barreras reproductivas y en realidad corresponden a dos especies distintas. Lo que se nombraba como una sola especie, *P. delicatissima,* actualmente son dos: *P. delicatissima* y *P. arenysensis*.

—Esther Garcés y Sonia Quijano
Instituto de Ciencias del Mar (CSIC)
Barcelona

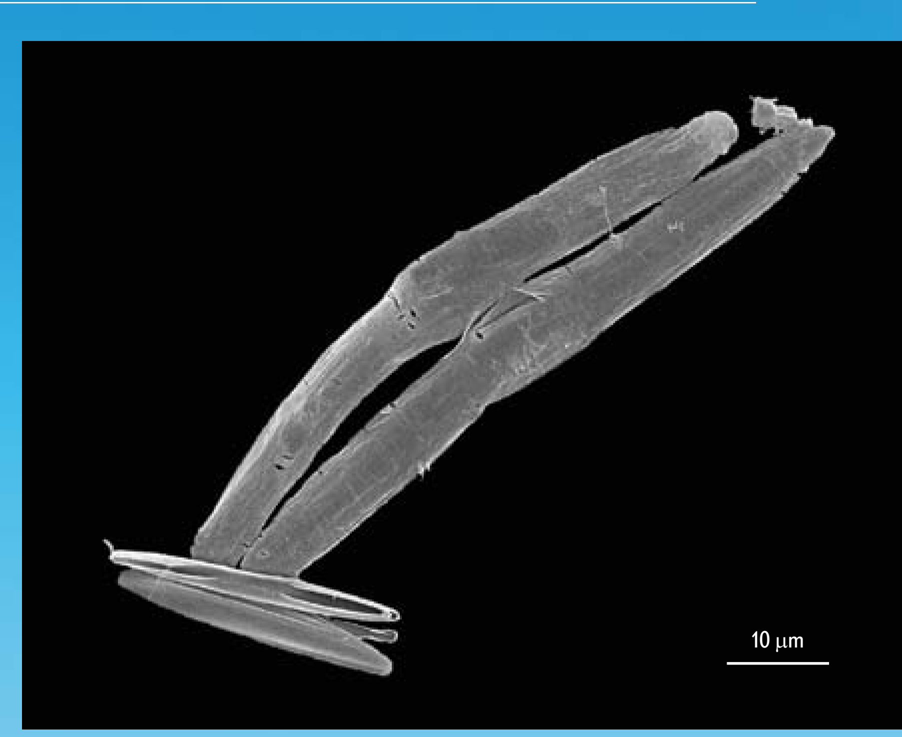


J. CAMP

Proliferaciones de fitoplancton en la costa de Tarragona (*zonas en azul turquesa*).

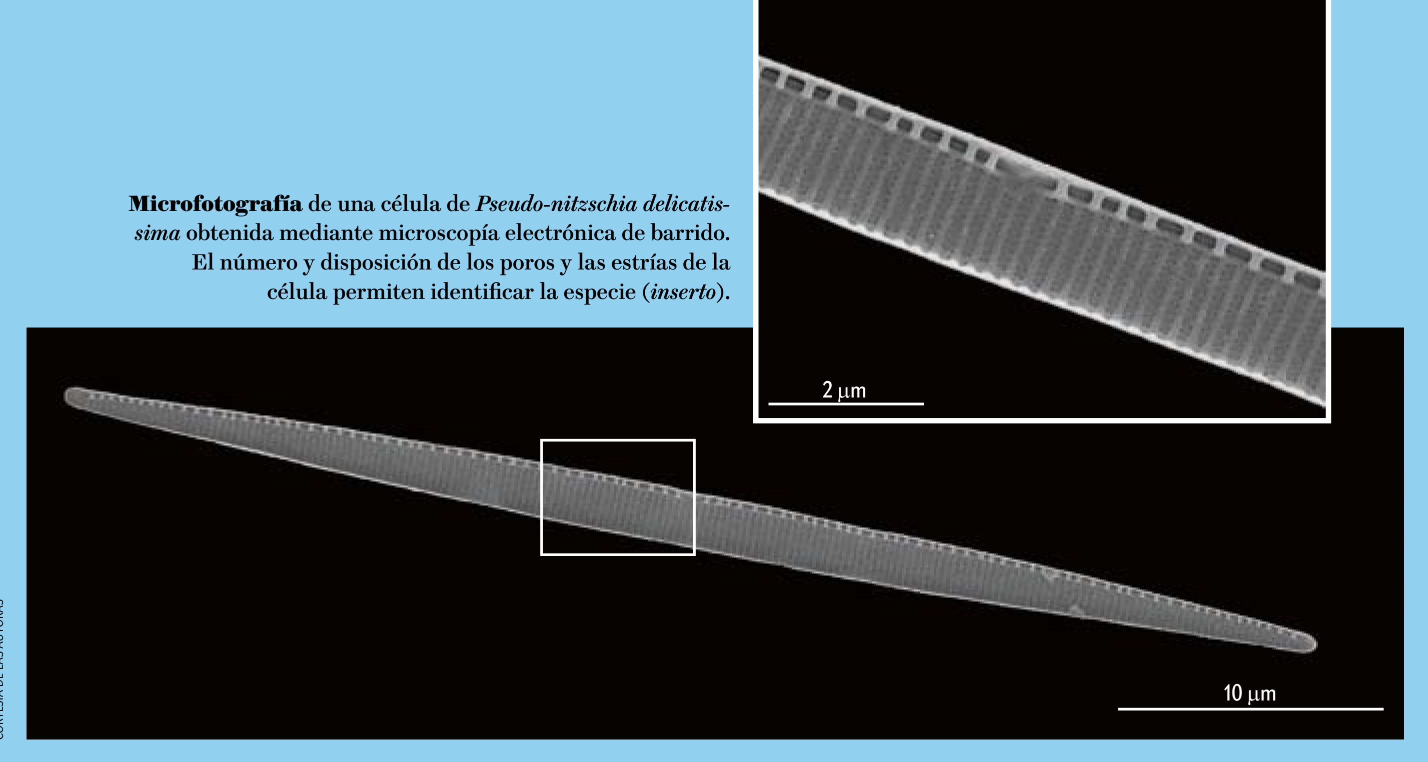


Células vegetativas, en forma de cadena, de diatomeas del género *Pseudo-nitzschia*. Imagen de un cultivo obtenida con el microscopio óptico.



Proceso sexual de auxosporulación en *Pseudo-nitzschia*. La reproducción sexual entre las células da lugar a dos auxosporas (células especializadas en la reproducción sexual) que restablecen el tamaño celular de la población. Imagen obtenida mediante microscopía electrónica de barrido.

Microfotografía de una célula de *Pseudo-nitzschia delicatissima* obtenida mediante microscopía electrónica de barrido. El número y disposición de los poros y las estrías de la célula permiten identificar la especie (*inserto*).



CORTESÍA DE LAS AUTORAS

por Jesús María Galech Amillano



Jesús María Galech Amillano es profesor del Centro de Historia de la Ciencia de la Universidad Autónoma de Barcelona y de la Escuela Massana de Barcelona.

Einstein, Picasso y la creatividad

Relatividad, cubismo y popularización de la ciencia a principios del siglo xx

Las palabras creatividad e innovación son omnipresentes en los tiempos que vivimos, fetiches con poderes casi sobrenaturales. Sin embargo, nadie ha conseguido aún explicarlas en profundidad; el reto forma parte del enorme proyecto multidisciplinar que intenta describir el funcionamiento del cerebro humano. Ambos conceptos delimitan un ámbito de moda, como puede comprobarse en cualquier librería, donde abundan los títulos dedicados a estos temas desde las perspectivas más heterogéneas. Estas miradas a la creatividad y la innovación con frecuencia recurren a la vida de personajes como Albert Einstein o Pablo Ruiz Picasso, y basan sus argumentos en la asociación de los procesos creativos a maneras de hacer, presentes tanto en un contexto científico como en uno artístico.

A lo largo del siglo xx, el arte, el diseño, la ciencia y la tecnología se erigieron como los campos de juego más importantes de la creatividad. Ello justifica que disciplinas como la historia de la ciencia y la historia del arte sean adecuadas para analizar cómo se genera la creatividad y se desarrolla la innovación. Einstein y Picasso son dos mitos del siglo xx; existe una amplia bibliografía sobre ellos dentro de los estudios históricos de sus respectivas disciplinas. Pero también existe —y esto tal vez sea menos conocido— una historiografía común a ambos personajes, análisis que forman parte del renovado entusiasmo con que se afronta desde hace tres décadas una historia conjunta o transversal de las ciencias y las artes. Sus resultados más recientes permiten matizar y corregir algunas de las afirmaciones más comunes en el tema que nos ocupa.

Relatividad y cubismo

Uno de los casos más conocidos en la historia de una cultura unificada, tanto humanística como científica, es la supuesta relación entre la teoría de la relatividad de Einstein (relatividad especial, 1905; relatividad general, 1916) y la pintura cubista desarrollada entre 1907 y 1914 principalmente por Picasso y George Braque. Los primeros textos que defendían esta conexión aparecieron durante los años cuarenta del siglo pasado en EE.UU.; enfatizaban las referencias a la «cuarta dimensión» y a la «geometría no euclídea» que se pueden encontrar en la literatura cubista, temas que se asociaban entonces con la teoría de la relatividad. A pesar de lo atractivo de este hipotético puente entre dos personajes históricos tan conocidos y representativos, la investigación en historia de la ciencia y el arte sugiere ahora un escenario distinto. Ni la geometría no euclídea ni la cuarta dimensión estaban presentes en la teoría de la relatividad especial tal y como Einstein la formuló en 1905, sino que se integraron, en forma de espacios de Riemann de cuatro dimensiones, en la teoría de la relatividad general publicada por el físico once años después.

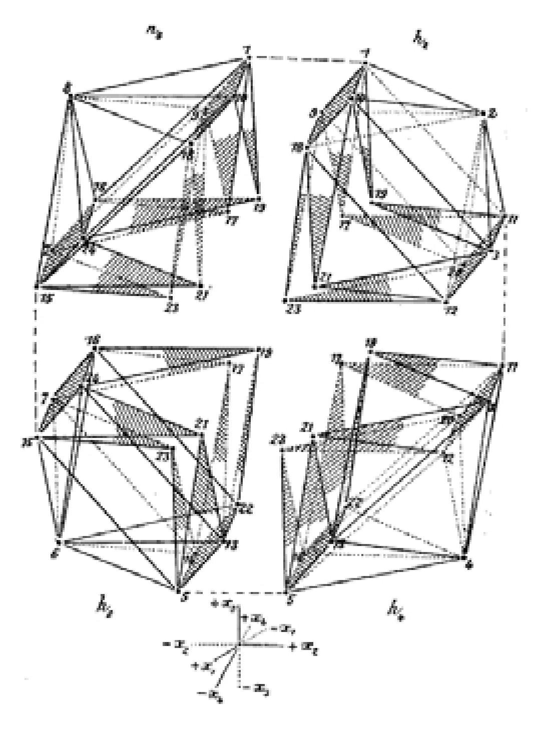
Así, a pesar de no mejorar nuestra comprensión del cubismo, los libros escritos en los años cuarenta sobre la posible relación entre este movimiento artístico y la relatividad sí permiten conocer algunas de las ideas y problemas más relevantes de la ciencia y el arte de aquella década. Ofrecen una muestra del interés que despertaba el concepto de tiempo y su relación con el de movimiento en la física y química de sistemas alejados del equilibrio. Asimismo, permiten entender por qué surgieron en el mundo del arte nuevas explicaciones de la pintura cubista desde la perspectiva del movimiento que buscaban establecer una tradición histórica para el llamado arte cinético.

Un ejemplo de esto último lo podemos encontrar en el artista László Moholy-Nagy, en cuyos libros *La nueva visión* (1946) y *Visión en movimiento* (1947) interpretaba las obras cubistas de Picasso y Braque considerando el tiempo como la cuarta dimensión. Todo ello en unos años, los posteriores a la bomba atómica, en los que Einstein ya era un científico de fama planetaria (en 1999 la revista *Time* le nombró «personaje del siglo xx»). Cuando se extendía en algunos sectores del arte y la cultura la idea de que, lo mismo que las teorías físicas habían cambiado nuestra imagen del mundo, el arte o forma de expresión que abarcase los nuevos principios de la ciencia sería el más apropiado para un nuevo mundo espaciotemporal.

Para que Picasso pudiera incluir en su trabajo pictórico nociones relativistas, primero era necesario que tuviera acceso a estas ideas. Algo factible en caso de que hubiera mantenido una relación directa con las personas implicadas en el desarrollo de la relatividad o con sus escritos, o bien indirecta a través de terceros, como obras de popularización y divulgación o personas cercanas al artista e interesadas en las nuevas teorías. Picasso nunca se relacionó con las personas implicadas en la gestación de la teoría de la relatividad, con lo que puede descartarse la primera opción. Fue un pintor parco en palabras sobre su obra, si bien es abundante la información procedente de su círculo próximo de amistades, entre los que destacan dos de sus amigos, el poeta Guillaume Apollinaire y el actuario de seguros y matemático Maurice Princet. En la actualidad se conserva la biblioteca particular de Apollinaire, vista en ocasiones como una muestra del tipo de libros accesibles a Picasso; Princet pudo desempeñar una función clave en torno a la cuarta dimensión y la llegada de esta al mundo del arte.

Cubismo y popularización de la ciencia

Entre los autores presentes en la biblioteca de Apollinaire destaca el físico, matemático y filósofo de la ciencia Henri Poincaré, quien en 1902 publicó en París *Ciencia e hipótesis*, uno de los libros más influyentes de su tiempo dentro y fuera de la ciencia. Una obra que, junto con el





Proyecciones sobre el plano de algunas vistas de los dieciséis octaedros fundamentales conforme rota un icosatetraedroide de cuatro dimensiones, del libro de Esprit Jouffret *Traité élémentaire de géométrie à quatre dimensions et introduction à la géométrie à n dimensions* (1903) y *Retrato de Daniel-Henry Kahnweiler* (1910), de Pablo Picasso.

resto del trabajo de Poincaré, tuvo gran importancia en el desarrollo de la teoría de la relatividad. Un año después, el otro amigo mencionado de Picasso, Princet, se dedicaba a divulgar entre sus conocidos los recientes resultados matemáticos que había leído en el libro del también actuario y matemático Esprit Jouffret, titulado *Tratado elemental de la geometría de cuatro dimensiones*, publicado en 1903 en París. En este ejercicio estético de popularización de la matemática, Jouffret hacía más accesible al público algunas de las ideas que había difundido Poincaré el año anterior sobre cómo imaginar y representar matemáticamente objetos de cuatro dimensiones espaciales.

Esos dos libros son determinantes para quienes defienden que la pintura cubista guarda relación con la relatividad, convirtiendo la cuestión de la geometría de cuatro dimensiones en su eje argumental. Suelen concluir que el interés de Einstein por los trabajos sobre la cuarta dimensión habría surgido, en parte, de Poincaré; mientras que el de Picasso por el mismo tema vendría de las numerosas tertulias con sus amigos Apollinaire y Princet.

La hipótesis histórica descrita hasta aquí ofrece ya una conclusión interesante: la influencia y apropiación de la ciencia en otros ámbitos con frecuencia está mediada y reformulada por la popularización y divulgación de la ciencia, lo que convierte a esta última en un objeto de atención muy destacable para la historia de la ciencia y para la comprensión de nuestra cultura contemporánea. Así, Poincaré constituye un punto de interés en el caso de una posible conexión indirecta entre Einstein y Picasso. Su *Ciencia e hipótesis* trata, en parte, de la cuarta dimensión espacial, reflejando así un tema que llevaba varias décadas en circulación y que tendría su reflejo artístico en lienzos cubistas como el *Retrato de Daniel-Henry Kahnweiler* (1910), en el que Picasso parece querer mostrar la existencia de una realidad mucho más compleja que nuestra percepción de ella. La capacidad de percepción humana había quedado una vez más cuestionada empíricamente tras el descubrimiento de los rayos X en 1895 y la posterior popularización de sus imágenes, pues estas desvelaban una realidad transparente, permeable, sin una piel que separase el interior del exterior. En la obra de Picasso se observa también cierta similitud entre su representación de una forma y un espacio sin fronteras claras y los diagramas sobre objetos de cuatro dimensiones que Jouffret había incluido en su tratado.

Desde finales del siglo XIX, antes de que el público tuviera noticias de Einstein o de su teoría de la relatividad, la ciencia fue testigo de una espectacular serie de hallazgos que pusieron en duda la comprensión de la materia y el espacio. Las nuevas geometrías, los rayos X, la radiactividad, las ondas de radio y la electricidad formaban parte del imaginario científico popular del tiempo de Poincaré y de los jóvenes Einstein y Picasso, de la atmósfera cultural en que vivían. Cuestiones que desvelaban la existencia de ámbitos invisibles al ojo humano, que pasaban de ser una especulación mística o filosófica a formar una nueva explicación científica de la realidad. Son las ideas que, junto con su conocido interés artístico por la pintura de Paul Cézanne y el arte ibérico y africano, pudieron contribuir al cubismo de Picasso.

Poincaré tiene, también, un lugar destacado en la historia de la creatividad. Dedicó una parte de su *Ciencia e hipótesis* a describir la creatividad y la invención, que para él constaban de dos etapas. En la primera, una persona genera, quizás al azar, múltiples combinaciones de todo tipo entre las ideas con las que convive. En la segunda, evalúa todas las combinaciones y estructuras encontradas para escoger con cuál proceder. Tal vez fuera este el camino seguido por Einstein y Picasso.

PARA SABER MÁS

Picturing science, producing art. Dirigido por Caroline A. Jones y Peter Galison. Routledge, Nueva York, 1998.

The visual mind II. Dirigido por Michele Emmer. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2005.

Surrealism, art and modern science: Relativity, quantum mechanics, epistemology. Gavin Parkinson. Yale University Press, New Haven y Londres, 2005.

Einstein y Picasso: El espacio, el tiempo y los estragos de la belleza. Arthur I. Miller. Tusquests, Barcelona, 2007.

Einstein for the twenty-first century: His legacy in science, art, and modern culture. Dirigido por Peter L. Galison, Gerald Holton y Silvan S. Schweber. Princeton University Press, Nueva Jersey, 2008.

DE *TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE DE GÉOMÉTRIE À QUATRE DIMENSIONS ET INTRODUCTION À LA GÉOMÉTRIE À N DIMENSIONS*, POR ESPRIT JOUFFRET, PÁG. 153, 1903 (*octaedros*); INSTITUTO DE ARTE DE CHICAGO (*Retrato de Daniel-Henry Kahnweiler*)

por Xavier Obradors



Xavier Obradors dirige el Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona, del CSIC, y el consorcio Barcelona Nanotechnology Cluster-Bellaterra.

¿Podemos hacer más con menos?

Nanotecnología, la ineludible necesidad del siglo XXI

Las revoluciones industriales acaecidas a lo largo de los últimos 150 años han estado en buena medida ligadas a nuevos paradigmas energéticos: la máquina de vapor y el petróleo. La acumulación de conocimientos básicos en física y química, junto con el desarrollo de la ciencia de materiales y la ingeniería, que los integraron, hicieron posible cambios inusitados en nuestra capacidad de fabricar utensilios. La ciencia y la tecnología del siglo XX transformaron las comunicaciones, los transportes y el consumo, todo ello gracias a la disponibilidad, en apariencia ilimitada, de materiales y energía.

Sin embargo, en los albores del siglo XXI se ha hecho patente la necesidad de transformar el paradigma de nuestra civilización respecto a su diálogo con la naturaleza. Se nos plantea uno de los mayores retos a los que jamás se haya enfrentado la humanidad: ¿es posible satisfacer las necesidades materiales y energéticas de una población que a mediados del siglo XXI estará formada por cerca de 10.000 millones de habitantes que aspiran a una elevada calidad de vida, y todo ello sin malograr nuestro entorno natural? Sin duda la respuesta será negativa, a menos que consigamos un nuevo modelo de desarrollo competitivo y sostenible. Debemos encontrar formas más sostenibles de fabricar y usar los bienes materiales y energéticos para evitar llegar a guerras fratricidas asociadas a la escasez. En definitiva, tenemos que hacer más con menos.

Afortunadamente, el siglo XX nos ha dejado como herencia la mejor herramienta para enfrentarse a dicho reto colosal: el conocimiento científico. La física, la química, la biología y la ingeniería permiten hoy crear sinergias antes inimaginables. Este es precisamente el terreno en el que se desarrollan la nanociencia y la nanotecnología: el de la multidisciplinariedad y la transversalidad que permiten generar ideas rompedoras, sacando el máximo partido de los procesos que ocurren a escala atómica y molecular para fabricar con el mínimo consumo de materiales y energía.

La nanotecnología se halla en disposición de transformar la industria y el consumo. Sin embargo, para ello es preciso que seamos mucho más eficientes en la transferencia del conocimiento a una industria que debe ser flexible, adaptable y abierta. Cuando hablamos de una nueva economía basada en el conocimiento, nos referimos a esto, a una «eco-industria» que dispone de nuevas herramientas, usa nuevos nanomateriales, economiza recursos y recicla todo lo que fabrica o utiliza.

En EE.UU. se están llevando a cabo los proyectos «Genoma de los materiales» y «Red para las manufacturas avanzadas». Se proponen acelerar la generación y la transferencia de conocimiento mediante la implementación de nuevas infraestructuras que permitan reducir a la mitad el tiempo necesario para ir de la invención a la innovación. Para ello se ha creado una red de centros basados en la cooperación público-privada que deben orquestar la creación y el desarrollo de materiales, su manufactura y su integración en la tecnología emergente correspondiente [*véase el informe especial* «El futuro de la fabricación», *en este mismo número*].

En Europa existen iniciativas similares, pero menos ambiciosas y con mayores dificultades en su desarrollo debido a la usual lentitud en la toma de decisiones. Sin embargo, no podemos quedar al margen de la nueva revolución industrial que se avecina. La sociedad que se retrase en adaptar su estructura productiva quedará rezagada y fuera de juego en el panorama internacional. Ya no se trata de conseguir ventajas competitivas mediante una economía de escala o mano de obra barata. El espíritu emprendedor, la innovación y la flexibilidad son hoy las claves del éxito. Las grandes corporaciones industriales liderarán una parte del proceso, pero estas suelen reaccionar con una cierta lentitud a los cambios. Por ello, y dado que no siempre se requieren grandes inversiones, se generarán oportunidades para las industrias pequeñas pero flexibles que sepan aprovechar una elevada permeabilidad con los generadores de conocimiento: los investigadores.

España ha afianzado una posición internacional más que envidiable en la investigación en nanociencia y nanotecnología. Sin embargo, seguimos siendo ineficaces en la transferencia del conocimiento a un sector productivo, que no nos detecta como un catalizador del progreso y el crecimiento. Nuestro recorrido entre la invención y la innovación es tortuoso y en este «valle de la muerte» se malogran demasiadas ideas. La famosa paradoja europea (liderazgo en ciencia y retraso en innovación) se ha visto aquí empeorada por un espejismo socioeconómico, la posibilidad de conseguir beneficios sin esfuerzo y sin necesidad de promover la competitividad, que nos ha sumido en una crisis sin precedentes.

No saldremos de este atolladero si nuestra industria permanece en la cola de Europa en su esfuerzo inversor en I+D y, en consecuencia, en la generación de patentes. Somos unos afamados consumidores de tecnología pero no queremos asumir la responsabilidad y la iniciativa de desarrollarla y fabricarla de forma competitiva, lo cual castiga de forma intolerable nuestra generación de oportunidades laborales. En 30 años, España ha retrocedido de la novena a la decimocuarta posición en la clasificación de países por capacidad de manufacturación; en solo 20 años, el peso de la industria en el empleo ha descendido del 40 al 20 %. A escala mundial, el 70 % de las exportaciones y el 90 % de la I+D industrial están ligados a las manufacturas. Europa tendrá que volver a ser (como en las anteriores revoluciones industriales) una creadora de bienes y manufacturas, o no será. Y todo ello, manteniendo la sostenibilidad ambiental. Estos son los retos a los que nos enfrentamos y la nanotecnología está aquí para echarnos una mano.



ECOLOGÍA

Lagos alpinos: observatorios del cambio global

Una gran sensibilidad a las alteraciones ambientales convierte a estos ecosistemas remotos en excelentes atalayas para el estudio del clima y la contaminación

Lluís Camarero



Los sedimentos del lago Redon, en los Pirineos Centrales, han arrojado luz sobre los cambios ambientales del Holoceno.

Lluís Camarero es investigador del Centro de Estudios Avanzados de Blanes del CSIC y responsable científico del Observatorio Limnológico de los Pirineos. Desde hace 25 años lleva a cabo estudios sobre la biogeoquímica de los lagos alpinos.



EL CAMBIO AMBIENTAL GLOBAL CONSTITUYE UNO DE LOS fenómenos de mayor interés para la investigación científica actual. Pero, ¿a qué cambio nos referimos exactamente? La biosfera, la capa de nuestro planeta donde se desarrolla la vida, no ha parado nunca de sufrir variaciones. Entre los factores que más han contribuido a esa transformación destaca la aparición de la vida, ya que modificó la química de la atmósfera y los océanos, con importantes consecuencias sobre el clima y, en general, las condiciones ambientales de la Tierra. Los grandes procesos geológicos (el vulcanismo o la emergencia de corteza continental, entre otros) y los de tipo astronómico (cambios en la radiación solar y en cómo esta es interceptada por la superficie terrestre debido a variaciones en la órbita y posición de la Tierra) completan la lista de causas principales del cambio ambiental natural que tiene lugar a escala planetaria y a diferentes escalas de tiempo.

Sin embargo, la expresión «cambio ambiental global» (o «cambio global») se utiliza hoy en día sobre todo para referirse a los cambios ambientales inducidos por la acción del hombre. Este sesgo hacia lo antropogénico queda justificado si tenemos en cuenta, en primer lugar, que dichas actividades humanas entrañan repercusiones de alcance planetario y, en segundo lugar, que la velocidad a la que este cambio se produce parece que supera a la de la capacidad de adaptación de los ecosistemas. Uno de los principales objetivos en el estudio de este fenómeno ambiental es, por tanto, discernir qué parte se debe a causas naturales y cuál a causas humanas.

Dos tipos de procesos provocan cambios a gran escala. Por un lado, los que han adquirido una dimensión planetaria pero solo mediante la suma de impactos locales (como la fragmentación del territorio o los cambios de usos del suelo). Por otro, los que, con independencia de cuál sea su origen, tienen efectos que se propagan a escala planetaria a través de las envolturas fluidas de la Tierra: las aguas oceánicas y continentales y, sobre todo, la atmósfera. En esta segunda clase se incluyen los procesos considerados más genuinamente globales, en los que se tiende a hacer hincapié cuando se habla del cambio ambiental global.

Ese segundo tipo de procesos se divide, a su vez, en dos grandes grupos. En primer lugar, los que suponen una alteración de los ciclos biogeoquímicos de los elementos. Ejemplos de ello corresponden a la acumulación de dióxido de carbono atmosférico (causante, en parte, del cambio climático y de la acidificación de los océanos), la reducción del ozono estratosférico que filtra el exceso de radiación solar ultravioleta, y el aumento de nitrógeno y fósforo en circulación en la biosfera, cuyo efecto fertilizante puede alterar las redes tróficas. El segundo grupo de procesos son los que están provocando una toxificación de la naturaleza: a saber, la contaminación por compuestos ácidos (óxidos de azufre y nitrógeno derivados de los combustibles fósiles), elementos traza potencialmente tóxicos (plomo, cadmio, arsénico) o moléculas sintéticas como fármacos, pesticidas o aditivos industriales, con un variado espectro de efectos sobre los organismos.

SENSORES DE DETECCIÓN PRECOZ

Por encima de la línea de bosque se hallan unos peculiares ecosistemas que están arrojando luz sobre el complejo fenómeno del cambio global. Nos referimos a los lagos alpinos. ¿Por qué son estos tan sensibles a las alteraciones ambientales? Una primera razón es que, en la alta montaña, las condiciones climáticas varían de forma muy acentuada con la altitud: de un am-

EN SÍNTESIS

Los lagos alpinos son ecosistemas sensibles y libres de impactos locales. Por tanto, las manifestaciones del cambio global son más fácilmente observables en ellos que en otros lugares. Asimismo, albergan en los sedimentos un registro de los cambios pasados que arroja luz sobre su historia ambiental.

Los fósiles de microalgas hallados en los sedimentos lacustres han permitido determinar los componentes del clima invernal del Holoceno en los Pirineos: un calentamiento progresivo durante los 6000 años posteriores a la glaciación, oscilaciones periódicas de 2000 años y varios pulsos fríos.

También la contaminación atmosférica llega a los lagos. Desde hace siglos, metales como el plomo han contaminado sus sedimentos y los suelos circundantes, que liberan ahora parte del plomo acumulado. Y la fertilización causada por el reciente aumento de la deposición de nitrógeno está desequilibrando la red trófica lacustre.

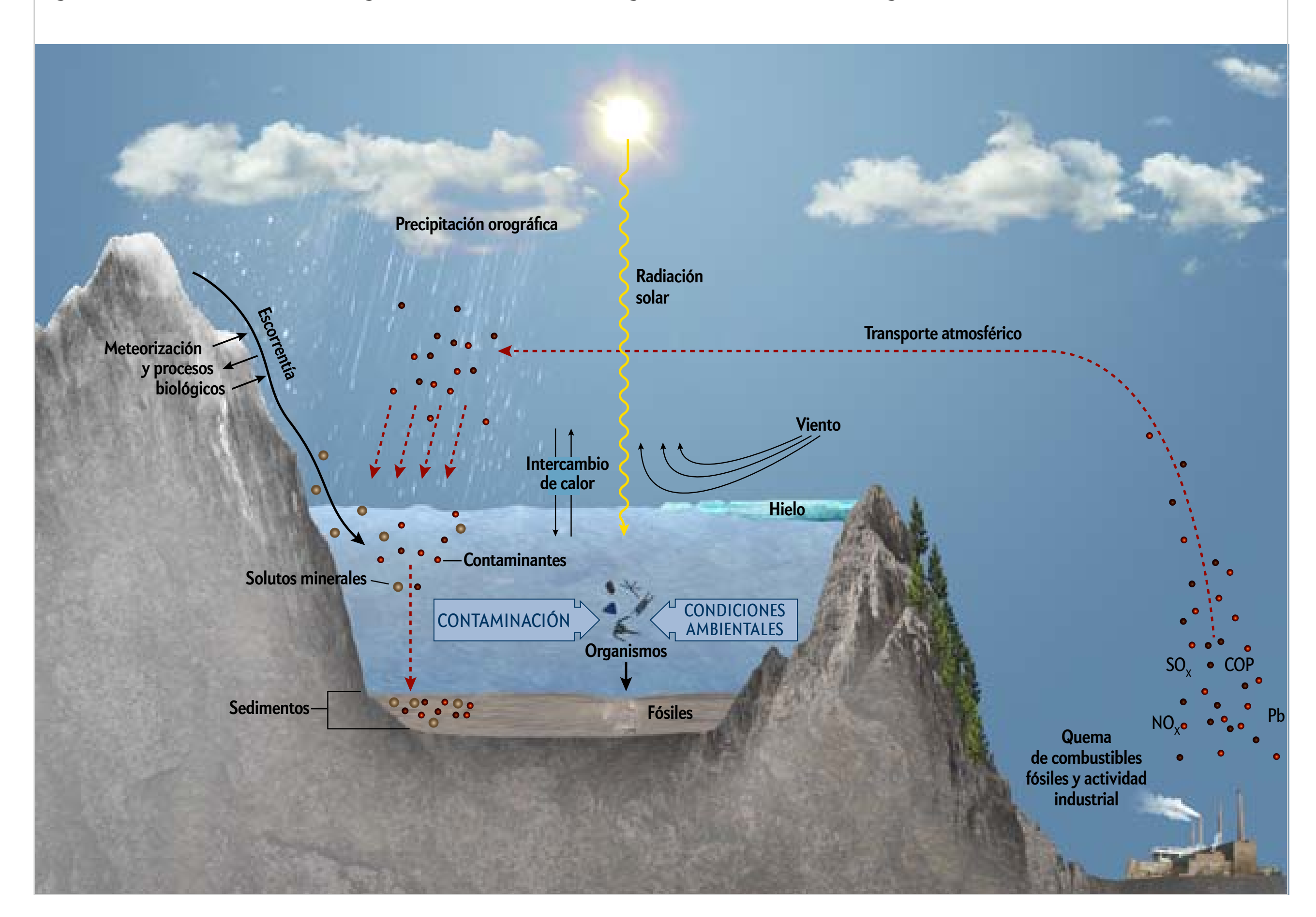
PÁGINAS ANTERIORES: MARC SALA

Atalayas para la observación ecológica y ambiental

Los lagos alpinos reciben influencias externas que afectan a su ecosistema. En primer lugar, los factores climáticos: precipitación, escorrentía, radiación solar, viento y temperatura. Estos determinan en gran medida cuáles son las condiciones ambientales en el seno del lago, sobre todo la disponibilidad de luz y nutrientes de la que dependen los organismos fotosintéticos y, en última instancia, todos los de la red trófica que se sustenta en ellos.

En segundo lugar destaca la contaminación, que suele tener un origen remoto. Los contaminantes llegan a las montañas tras un largo viaje por vía atmosférica y, debido al efecto orográfico que intensifica la precipitación, se depositan en el lago. Destacan el plomo (Pb), los óxidos de azufre (SOx) y de nitrógeno (NOx), responsables de la lluvia ácida, y los contaminantes orgánicos persistentes (COP).

Clima y contaminación afectan, por tanto, a los organismos que viven en un lago alpino. La sedimentación de los contaminantes y de restos fósiles de estos organismos da lugar a un registro de las alteraciones que ha sufrido el ecosistema, convirtiéndolo en un sensor remoto del cambio global.



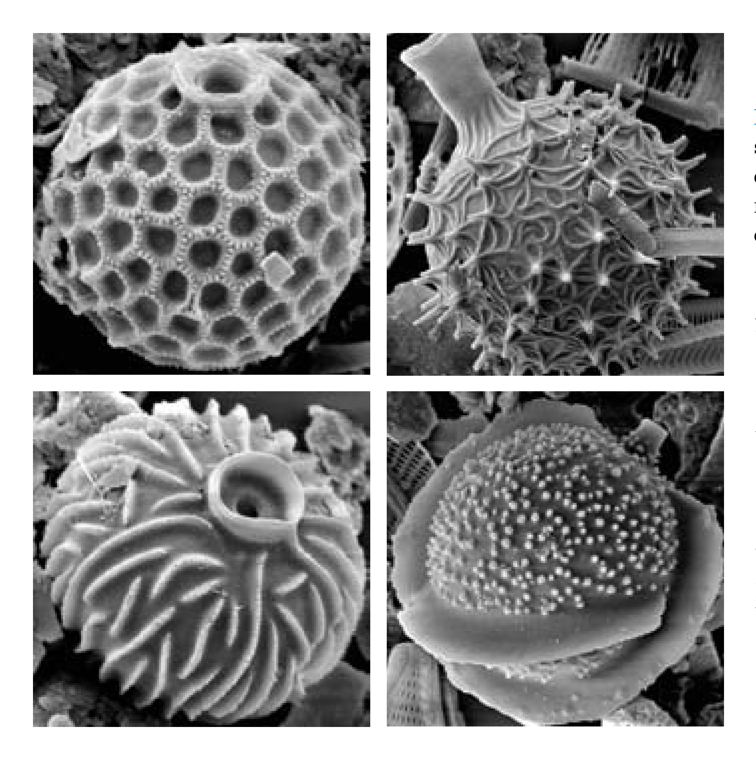
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA SEGÚN EL AUTOR

biente más benigno en la falda a otro glacial en las cimas. A lo largo de este eje altitudinal de variación se sitúan diversos umbrales climáticos y ecológicos, puntos donde ocurren transiciones bruscas, como el límite de las nieves perpetuas o el límite del bosque. Estos umbrales pueden sufrir desplazamientos notables en respuesta a cambios del clima pequeños, lo que afecta muy marcadamente a los lagos que quedan al otro lado del nuevo umbral.

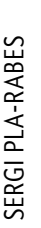
Que lo lagos alpinos muestren tan elevada sensibilidad ambiental se debe también a sus aguas, muy diluidas. Al hallarse estos en cuencas de cabecera de pendientes acusadas (donde la escorrentía es de corto y rápido recorrido) y a menudo sobre sustratos rocosos poco solubles (por lo que la interacción entre el sustrato y el agua es mucho menor que en las cuencas de aguas abajo), sus aguas presentan una concentración baja. Ello hace que los solutos que llegan con la precipitación atmosférica tengan un peso relativo notable, y también que resulte más fácil detectar cambios sutiles en la química lacustre.

Además, los lagos alpinos suelen hallarse exentos de impactos directos, alejados de los puntos de emisión de contaminantes y por encima de la capa atmosférica de mezcla, situada por debajo de los 1000 metros de altitud y más afectada por las emisiones locales. Ello permite atribuir a fuentes regionales o globales la contaminación que pueda detectarse en ellos.

Finalmente, debemos tener en cuenta que en las montañas se produce una elevada deposición de contaminantes. Ello se debe a dos factores. Primero, la precipitación atmosférica es mayor que en tierras bajas debido a la orografía, por lo que las partículas atmosféricas son arrastradas en mayor medida del aire al suelo. Segundo, ciertos contaminantes orgánicos que son volátiles a temperaturas cálidas o templadas tienden a condensarse cuando son transportados a ambientes fríos, como los polos



El análisis morfológico de los microfósiles que contienen los sedimentos lacustres permite determinar el clima del pasado, ya que cada especie prolifera en unas condiciones ambientales determinadas. Las imágenes corresponden a varios estomatocistos (fundas silíceas) de crisofíceas (microalgas) hallados en el lago Redon.



terrestres o las cimas de las montañas (se habla de las montañas como del «tercer polo» de la Tierra), causando lo que se conoce como la destilación global de contaminantes orgánicos persistentes.

Por todas esas razones, los lagos alpinos operan como unos sensores de detección precoz. El territorio circundante, que vierte sus aguas al lago (cuenca de recepción), vendría a ser la antena que recoge las señales atmosféricas climáticas y químicas. A través de la escorrentía, estas señales llegan al lago, donde se manifiestan de diversas maneras, pudiendo llegar a inducir cambios en el estado ecológico del mismo. La observación continuada de diversos parámetros físicos, químicos y biológicos de los lagos permite constatar en tiempo real estos cambios, a pesar de lo sutiles o lentos que puedan ser. En este sentido, los lagos alpinos cuentan con un valor añadido: se encuentran distribuidos sobre toda la superficie de la Tierra, en entornos con unas características climáticas y topográficas muy similares aunque a diferentes altitudes en función de la latitud. Posiblemente no existen otros ecosistemas tan alejados y a la vez tan comparables entre sí, dos características que los convierten, en su conjunto, en un sistema ideal de observación del cambio ambiental global.

Y eso no es todo. Además, los lagos disponen de un «instrumento» de registro de las señales ambientales: los sedimentos. Se acumulan de forma secuencial en las zonas más profundas para luego, tras una descomposición parcial inicial (diagénesis), quedar allí depositados y «fosilizados», sin más alteraciones, durante miles de años. La información que contienen sobre el medio en que se crearon (en forma de la propia composición físico-química y de los tipos de microfósiles) puede ser descifrada e interpretada para reconstruir los cambios ambientales que ha experimentado el lago en el pasado.

Todos esos métodos de observación ecológica y reconstrucción paleoambiental que acabamos de presentar son los que utilizamos en el Observatorio Limnológico de los Pirineos para estudiar los lagos alpinos pirenaicos. (La limnología es la rama de la ecología que se ocupa de los ecosistemas acuáticos continentales.) El observatorio cubre una red hidrológica (ríos y lagos) de cuencas de alta montaña situadas en el Parque Nacional de Aigüestortes y Lago de San Mauricio, y su área de influencia. Los ecosistemas que son drenados por estas aguas comprenden bosques de ribera de montaña, hayedos, bosques de pino negro, praderas de alta montaña y zonas rocosas de las cumbres. El seguimiento se realiza en tres áreas: el lago Redon, tres ríos de cabecera de cuenca del Valle de Aran (Conangles, Molières y Nere), y diversos puntos en el Valle de Sant Nicolau del Parque Nacional.

Las investigaciones limnológicas de esa zona han arrojado luz sobre el pasado y el presente del clima, la contaminación por plomo y otros metales, el impacto de la lluvia ácida y el de las campañas para su mitigación. El estudio de estos fenómenos nos ayuda a comprender y valorar el alcance del cambio ambiental global actual.

LOS ÚLTIMOS 10.000 INVIERNOS

Durante el invierno —entendido este como la época en que las montañas están cubiertas de nieve—, los lagos alpinos se hielan. Con la llegada del buen tiempo el hielo se funde, y crecen las algas unicelulares del plancton. El desarrollo de estos microorganismos depende de las condiciones del agua (en especial el contenido en nutrientes), que, a su vez, están determinadas por la duración de la cubierta de hielo, que depende de la dureza del invierno. En consecuencia, el clima invernal determina la aparición de unas u otras especies de algas en función de las preferencias ambientales de estas.

Algunas microalgas dejan restos fósiles en los sedimentos de los lagos. Nos referimos a las crisofíceas. Forman unas fundas silíceas (estomatocistos) en las que se encapsulan y se depositan en el fondo del lago como forma de resistencia. Los estomatocistos de cada especie de crisofícea presentan formas y ornamentaciones características que permiten distinguirlas e identificarlas. Por tanto, a partir de su análisis microscópico pueden deducirse las características del clima invernal que reinaba en el momento de la sedimentación. Para averiguar qué estomatocistos hay bajo un lago, se extraen del fondo testigos de sedimento que se seccionan en láminas según los estratos. De cada uno de estos puede determinarse la edad mediante distintas técnicas de datación. Las más comunes son las isotópicas, basadas en el ^{14}C (para sedimentos de miles de años de antigüedad) o el ^{210}Pb (para datar con mayor precisión sedimentos de unos pocos cientos de años).

En el Observatorio aplicamos esas técnicas de análisis a un testigo extraído en 1994 del lago Redon, en los Pirineos Centrales. Ello nos permitió reconstruir el clima de los inviernos de los últimos 10.000 años (a partir del año 2000), es decir, el Holoceno, la época que se inició después de que el casquete de hielo que cubría los Pirineos durante la última glaciación se retirara dando lugar a la formación del lago.

Los datos obtenidos muestran una tendencia general dominante con un aumento progresivo de las temperaturas invernales desde el final de la glaciación hasta hace unos 4000 años. Ello contrasta con reconstrucciones climáticas basadas en otros indicadores que reflejan mejor las temperaturas de verano (el polen, por ejemplo). En estas, la temperatura aumenta más rápidamente, llegando al máximo en el período entre hace

8000 y 6000 años, el Óptimo Climático del Holoceno. La marcada diferencia entre las temperaturas estivales y las invernales indica un clima más continental durante la primera mitad del Holoceno.

Alrededor de la tendencia general se producen fluctuaciones de período más corto. Se observan oscilaciones en la temperatura en ciclos de entre unos 1500 y 2000 años. La penúltima engloba el período Cálido Romano y el período frío de la Antigüedad Tardía. La última incluye el período Cálido Medieval y la Pequeña Edad de Hielo; parecería culminar en la actualidad, pero quizás el cambio climático actual llegue a alterar este ciclo.

Cabe destacar que en esos ciclos también existen diferencias entre los períodos establecidos a partir de las reconstrucciones climáticas más usuales (basadas en indicadores de las temperaturas de verano) y lo que sugieren las crisofíceas (indicadores de las temperaturas invernales). Así, parece ser que los inviernos de la segunda mitad del período Cálido Romano fueron más fríos y los de la Antigüedad Tardía más cálidos de lo que podría suponerse. En realidad, los adjetivos «cálido» y «frío» que se asignan a estos períodos deberían interpretarse como una descripción de la benignidad del clima durante los meses de verano y otoño, con independencia de la posible crudeza de los inviernos.

Además de esos ciclos milenarios, aparecen otras fluctuaciones en la escala de unos pocos siglos como el Evento Frío de hace 8200 años, registrado en el hemisferio norte debido a un debilitamiento de la corriente cálida del Golfo.

A partir de hace 1000 años esas fluctuaciones más cortas se reconocen mejor porque los sedimentos lacustres se han acumulado a mayor velocidad y, por tanto, ofrecen mayor resolución (las secciones de esta parte del testigo corresponden a menos años que las de partes más antiguas del mismo grosor). Ya en el período Cálido Medieval (entre los siglos x y xiii de

PALEOCLIMATOLOGÍA

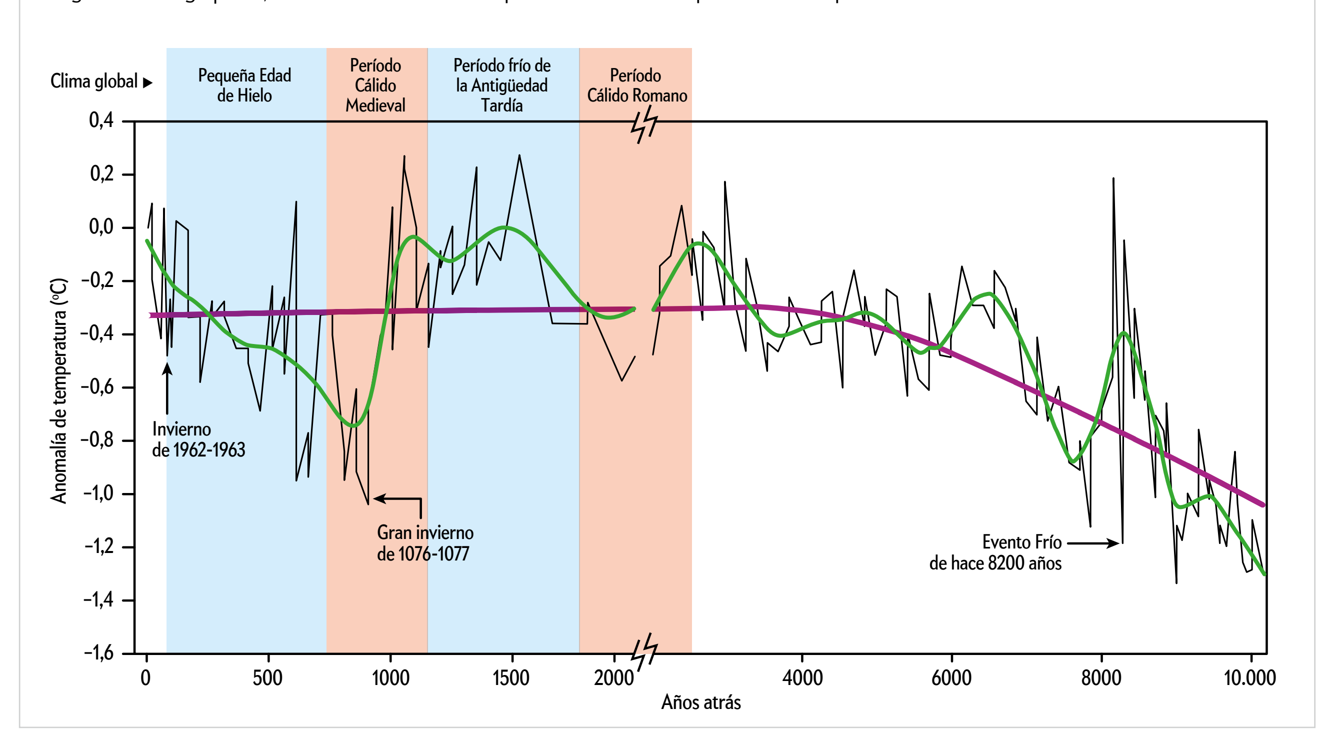
Inviernos cada vez menos fríos

Los sedimentos lacustres operan a modo de registro ambiental. Su composición constituye un reflejo de las condiciones climáticas del pasado. A partir de la datación de un testigo extraído del lago Redon (Pirineos Centrales) y del análisis de los microfósiles que este contenía, se ha reconstruido el clima en esa zona durante los inviernos de los últimos 10.000 años, es decir, del Holoceno. La gráfica ilustra la evolución de las temperaturas invernales durante este período respecto de la temperatura actual (anomalía de temperatura).

La línea morada, que indica la tendencia general a largo plazo, se obtiene tras filtrar (suprimir) las oscilaciones con períodos inferiores a entre 5000 y 6000 años; muestra un calentamiento progresivo desde el final de la última glaciación hasta hace unos 4000 años. La línea verde, en la que se han filtrado las oscilaciones con períodos inferiores a entre 500 y 1000 años, resalta los ciclos de entre 1500 y 2000 años, además de la tendencia principal.

Además de esos ciclos milenarios, aparecen fluctuaciones de unos pocos siglos, como el pulso frío de hace 8200 años. A partir de hace 1000 años, ya en el período Cálido Medieval, se produce una continentalización del clima. Esta caída de las temperaturas invernales podría indicar que la Pequeña Edad de Hielo llegó antes para los inviernos, puesto que las temperaturas invernales más bajas se registran precisamente en la fase central fría del período Cálido Medieval, durante el Gran Invierno de 1076-1077.

Después de las fluctuaciones frías y cálidas que se observan hace entre 600 y 700 años, se produce un aumento progresivo de las temperaturas, que podría corresponder a una particularidad climática regional diferenciada del patrón general de la Pequeña Edad de Hielo. Dentro de este calentamiento se identifican varios pulsos fríos, como el crudo invierno de 1962-63.



FUENTE: «CHRYSOPHYTE CYSTS FROM LAKE SEDIMENTS REVEAL THE SUBMILLENNIAL WINTER/SPRING CLIMATE VARIABILITY IN THE NORTHWESTERN MEDITERRANEAN REGION THROUGHOUT THE HOLOCENE». S. PLA Y J. CATALAN EN *CLIMATE DYNAMICS*, VOL. 24, PÁGS. 263-278, 2005

nuestra era), se produjo una caída brusca de las temperaturas invernales, una continentalización del clima que pudo haber durado hasta la recuperación de las temperaturas en el siglo XVIII. Entre los siglos XIV y XIX se sitúa la Pequeña Edad de Hielo, caracterizada por unas bajas temperaturas en todo el hemisferio norte. Según las crisofíceas, podría interpretarse que este período empezó antes para los inviernos, puesto que las temperaturas invernales más bajas del Holoceno (si exceptuamos las fases inmediatamente posteriores a la deglaciación) se registran en la fase central fría del período Cálido Medieval, durante el Gran Invierno de 1076-1077 (documentado en fuentes históricas de varios lugares de Europa).

Una nueva oscilación tiene lugar hace unos 700 años (de fase fría a cálida). Desde entonces y hasta la actualidad, se observa una fluctuación fría inicial seguida de un aumento progresivo de las temperaturas de invierno, lo cual podría corresponder a una particularidad climática regional diferenciada de la Pequeña Edad de Hielo. Dentro de esta tendencia al aumento, se identifican varios pulsos fríos; el más reciente corresponde al invierno de 1962-63, un invierno muy crudo en Europa (equiparable al de 1076-1077).

Junto con otros indicadores climáticos más comunes, que responden sobre todo al período cálido del año, la información que revelan las crisofíceas arrojará luz sobre la variabilidad estacional del clima holocénico en los Pirineos y en otras montañas con lagos del planeta, donde ya se están aplicando también estas técnicas.

HUELLAS DE LA ACTIVIDAD INDUSTRIAL

Además del clima del pasado, los sedimentos lacustres también permiten estudiar la evolución de ciertos contaminantes. La contaminación atmosférica a gran escala no es exclusiva de nuestras sociedades industriales desarrolladas. Desde tiempos de los antiguos griegos y romanos, la metalurgia ha generado una contaminación de dimensiones continentales.

Uno de los metales que se han emitido a la atmósfera en mayores cantidades es el plomo. El lago Redon ofrece un registro de ello: encontramos este contaminante ya en los sedimentos que datan del siglo VI a.C. A lo largo de la historia, se observan dos picos de concentración: en el pasado siglo XX (334 miligramos por kilogramo) y, sorprendentemente, en el siglo VII d.C. (513 mg/kg). La contaminación más moderna era esperable. El uso de gasolina con plomo provocó grandes emisiones de este metal en todo el hemisferio norte, a las que hay que sumar las derivadas de las actividades mineras locales y regionales. El declive de esta minería a partir de 1950 y la prohibición, más tarde, de la gasolina con plomo lograron que la contaminación disminuyera, lo que se refleja en los sedimentos más superficiales.

Las concentraciones de plomo que encontramos en los sedimentos del siglo VII d.C. son dos o tres veces más altas que las de los sedimentos contemporáneos; ello indica una contaminación aún más intensa que la moderna. Lo más verosímil es que el origen de esta contaminación fuera una fuente local cercana, ya que no es esperable que una polución más difusa y de mayor escala diera lugar a una concentración de Pb tan elevada. No hay datos históricos sobre la explotación minera en la zona durante esta época. Sin embargo, las prospecciones arqueológicas que se están llevando a cabo desde la última década en los Pirineos están desvelando una ocupación humana mucho más importante de lo que se creía. Entre otros restos, se han hallado hornos para el procesado de minerales que datan de la época romana.

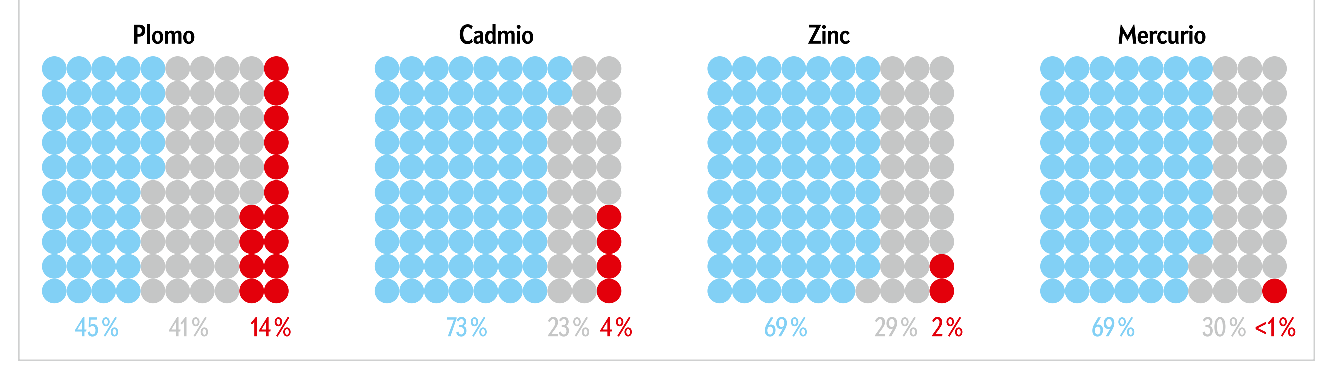
Sabemos que en períodos más recientes (siglos XVIII y XIX) existía una industria siderúrgica importante en los Pirineos. Por una parte, se aprovechaban los minerales que se extraían; por otra, con el carbón que se producía en los bosques y la energía hidromecánica que se obtenía de los arroyos de montaña se alimentaban los hornos y se hacían mover los fuelles de las fraguas de numerosas fundiciones artesanales, altamente contaminantes ya que no contaban con ningún tipo de filtro para las emisiones. Es más que probable que esta técnica se hubiera iniciado y extendido en siglos anteriores. Prueba de ello es que en otros lagos pirenaicos, además del Redon, se han encontrado altas concentraciones de metales contaminantes en sedimentos de varios períodos a partir del siglo XIII.

La contaminación por metales se ha detectado a lo largo de todos los Pirineos, aunque con una mayor incidencia en los Centrales y los Orientales. La concentración de plomo y de mercurio en los sedimentos contaminados ha aumentado entre 3 y 6 ve-

CONTAMINACIÓN INDUSTRIAL

Sumideros de metales

Los lagos pirenaicos acumulan una gran concentración de metales contaminantes. Estos llegan por vía atmosférica y a través del suelo. Los gráficos muestran los resultados extrapolados a partir de un estudio de 85 lagos pirenaicos, en los que se midieron los niveles de plomo, zinc, cadmio y mercurio. En la mayoría, la concentración de metales no superaba el límite por encima del cual se detectan los primeros efectos dañinos leves en organismos (*azul*). Sin embargo, se sobrepasaron dichos límites en numerosos casos (*gris*), y en algunos se superaron incluso los niveles a partir de los cuales pueden producirse daños graves (*rojo*).







Labores de extracción de testigos de sedimento en el lago de Llebreta (*izquierda*), en el Parque Nacional de Aigüestortes, y testigo del lago Forcat (*derecha*), en el andorrano Valle de Madriu.

MONTSERRAT BACARDIT (*lago de Llebreta*); LLUÍS CAMARERO (*lago Forcat*)

ces respecto a los más antiguos no contaminados. Y en los estratos superficiales los niveles superan los límites de ecotoxicidad.

A partir de un estudio de 85 lagos de los Pirineos se ha estimado que cerca de la mitad de los lagos de esta cordillera presentan concentraciones de plomo por encima del nivel al que se detectan los primeros efectos dañinos leves (descritos en organismos que medran en los sedimentos). Lo mismo, aunque en menor porcentaje de lagos, se ha observado para el mercurio, el zinc y el cadmio. En algunos casos, estos mismos cuatro elementos superan incluso el nivel a partir del cual ya pueden ocurrir efectos graves.

En los lagos más contaminados, las concentraciones de metales pueden llegar a ser del mismo orden que las que se encuentran en los sedimentos de zonas costeras marítimas y de grandes lagos afectadas directamente por emisiones de aguas residuales de ciudades, en los de ríos con vertidos industriales o en el fondo de puertos muy transitados. Que la contaminación llegue a ser tan elevada se debe a que los metales se depositan en toda la cuenca de recepción y acaban concentrándose en el lago, que opera como el sumidero final. Además, los sedimentos lacustres contienen una alta proporción de materia orgánica, que presenta una gran capacidad de retención de metales.

Pero los lagos no son los únicos receptores de contaminantes. También los suelos de las cuencas lacustres han acumulado metales que pueden removilizarse y constituir una fuente de contaminación retardada. Ello se ha constatado en el caso del plomo: estudios de la dinámica de este metal demuestran que en la actualidad los lagos pirenaicos están recibiendo más plomo del que les llega por vía atmosférica. Este exceso de plomo proviene de los suelos; las alteraciones en el funcionamiento de estos inducidas por el cambio climático (mayores tasas de descomposición de la materia orgánica, aumento de la erosión) podrían ser la causa de una mayor liberación de los metales acumulados.

Para hacernos una idea de la importancia del acopio de metales en los suelos podemos compararlo con las entradas atmosféricas actuales. En los Pirineos, la deposición anual de plomo contaminante es del orden de 1 miligramo por metro cuadrado; los suelos, en cambio, contienen alrededor de 1 gramo de plomo por metro cuadrado: mil veces más. Es decir, potencialmente, los suelos podrían liberar plomo a las tasas actuales de contaminación atmosférica durante los próximos mil años. No es de extrañar, puesto que el plomo y otros metales se han ido acumulando durante siglos, si no milenios, tal y como revelan los registros de los lagos.

AZUFRE Y NITRÓGENO ANTROPOGÉNICOS

Además de plomo, la quema de combustibles fósiles ha arrojado a la atmósfera una gran cantidad de óxidos de azufre y nitrógeno. Al reaccionar con el agua, estos han dado lugar a los ácidos sulfúrico y nítrico, los causantes de la lluvia ácida que se inició con la Revolución Industrial y alcanzó su máximo en los años setenta y ochenta del siglo xx, llegando también a los Pirineos. Se estima que las aguas de los lagos pirenaicos sufrieron en promedio una pérdida de alcalinidad (una medida de su capacidad para neutralizar los ácidos) de entre el 15 y el 20 por ciento a causa de la lluvia ácida, y un aumento correspondiente de las concentraciones de sulfato y nitrato (las sales derivadas de los ácidos depositados).

Con todo, los efectos fueron mucho menores que en otras áreas del centro y el norte de Europa, y en la vertiente sur de los Alpes. Ello se debe, por un lado, a una deposición ácida más moderada y, por otro, al efecto de los aportes atmosféricos de polvo de la península ibérica y del norte de África, rico en cationes básicos con capacidad para neutralizar los ácidos. En los Pirineos tan solo un 2 por ciento de los lagos cruzó el límite inferior crítico de alcalinidad (el valor por debajo del cual los salmónidos no pueden sobrevivir); en el resto de las regiones europeas mencionadas el porcentaje de lagos afectados superó el 25 por ciento, alcanzando en áreas de Escandinavia el 90 por ciento.

A partir de los años ochenta se promulgaron leyes para reducir las emisiones de óxidos de azufre, tenido entonces por el principal causante de la lluvia ácida. El análisis de las aguas lacustres ha demostrado que tales regulaciones surtieron efecto: se ha observado una disminución del sulfato disuelto en los lagos alpinos, en particular en los que se hallan en cuencas de granito. (Dado que este tipo de roca no contiene sulfatos, todos los que se detectan deben ser de origen atmosférico.) Desde los años ochenta, las concentraciones de esta sal en los lagos graníticos de los Pirineos han ido disminuyendo de forma progresiva, atestiguando la recuperación de los síntomas de la acidificación.

El nitrógeno, en cambio, continúa siendo un problema. A las emisiones de óxidos de nitrógeno se añade el amoníaco emitido por los suelos agrícolas y las explotaciones ganaderas intensivas. Estas formas de nitrógeno contaminante ejercen un efecto doble: por un lado —como ya hemos mencionado— acidifican el medio; por otro, lo fertilizan, lo que desequilibra las redes tróficas. Puesto que la reducción de azufre ha mitigado en parte el problema de la acidificación, el efecto fertilizante adquiere mayor relevancia [*véase* «El problema global del nitrógeno», por Alan R. Townsend y Robert W. Howarth; Investigación y Ciencia, abril de 2010].

Las cuencas de los Pirineos se encuentran saturadas de nitrógeno. Esto quiere decir que los aportes atmosféricos son mayores de lo que las cuencas son capaces de procesar y absorber. Por tanto, hay un sobrante de nitratos (la especie química en que el nitrógeno atmosférico se transforma mayoritariamente) disueltos en el agua que son lixiviados a los ríos y van a parar a los lagos. Esta superabundancia de nitratos ha crecido en los Pirineos durante las últimas décadas, en consonancia con el aumento de las emisiones de nitrógeno en España y la subsiguiente deposición en los Pirineos. En el resto de Europa, en cambio, las emisiones declaradas han disminuido.

Las consecuencias de ese exceso de nitrógeno sobre los ecosistemas pirenaicos en general, y sobre los lagos en particular, son todavía inciertas y tema de investigación. Además de la acidificación, en otros lugares se han detectado otros efectos: toxicidad por nitratos; cambios en la composición de especies; pérdida de biodiversidad; alteraciones funcionales y mortalidad en comunidades vegetales y de microorganismos, y aumento de las emisiones de gases de nitrógeno con efecto invernadero.

Un dato paradójico: a pesar de que el nitrógeno ha aumentado en la precipitación atmosférica y en los ríos que alimentan las cuencas lacustres de los Pirineos, ha disminuido en los lagos. Esto parece indicar que los lagos operan como biorreactores capaces de procesar parte del exceso de nitrógeno y apartarlo de la circulación; constituyen una suerte de sistema de autodepuración. Por otro lado, este fenómeno también sugiere que el estado ecológico de los lagos pirenaicos está cambiando: se están eutrofizando debido al exceso de nutrientes que llegan por vía atmosférica.

La eutrofización (aumento de la producción fotosintética) puede ocasionar efectos indeseables como la pérdida de transparencia del agua, debido al crecimiento excesivo del plancton, o la disminución del contenido de oxígeno en las aguas profundas. A ello contribuye no solo el aumento del nitrógeno antropogénico, sino también el incremento de los aportes atmosféricos de otro nutriente fundamental, el fósforo. Este fósforo viaja con el polvo que proviene del norte de África y de zonas áridas de la península ibérica; su transporte parece haberse intensificado debido a cambios en la circulación atmosférica, un efecto, entre otros, del cambio climático [*véase* «De África al Amazonas», por Jeffrey Bartholet; Investigación y Ciencia, abril de 2012].

Todos los resultados aquí presentados muestran que los lagos de los Pirineos se hallan más afectados por el cambio ambiental de lo que podría pensarse por su situación remota. Una prueba más del gran alcance de la influencia humana, que se extiende a los ecosistemas de todo el planeta.

PARA SABER MÁS

Chrysophyte cysts from lake sediments reveal the submillennial winter/spring climate variability in the northwestern Mediterranean region throughout the Holocene. S. Pla y J. Catalan en *Climate Dynamics*, vol. 24, págs 263-278, 2005.

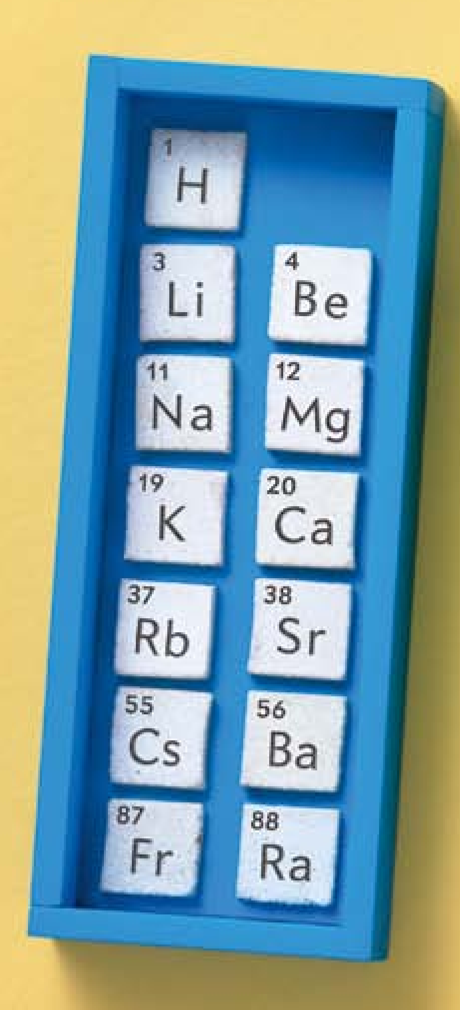
Recovery of acidified European waters. R. F. Wright, T. Larssen et al. en *Environmental Science and Technology. A-Pages*, vol. 39, n.º 3, págs. 64A-72A, 2005.

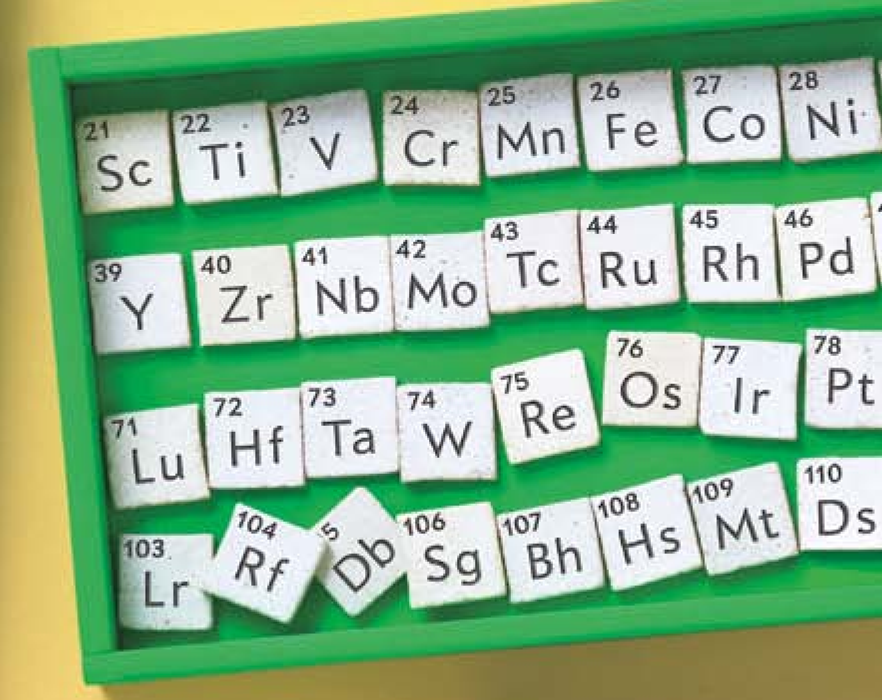
Trace elements in alpine and arctic lake sediments as a record of diffuse atmospheric contamination across Europe. L. Camarero, I. Botev et al. en *Freshwater Biology*, vol. 54, págs. 2518-2532, 2009.

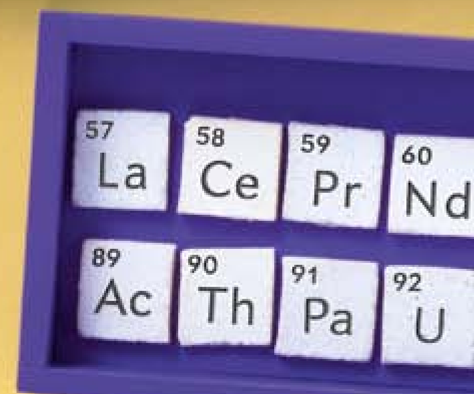
A safe operating space for humanity. J. Rockstrom, W. Steffen, et al. en *Nature*, vol. 461, n.º 7263, págs. 472-475, 2009.

Climate change: Sentinels of change. C. E. Williamson, J. E. Saros y D. W. Schindler en *Science*, vol. 323, n.º 5916, págs. 887-888, 2009.

Atmospheric phosphorus deposition may cause lakes to revert from phosphorus limitation back to nitrogen limitation. L. Camarero y J. Catalan en *Nature Communications*, vol. 3, n.º 1118, 2012.









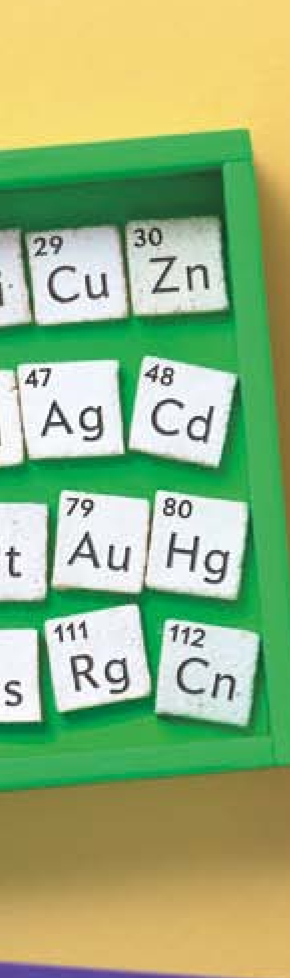
HOLLY LINDEM

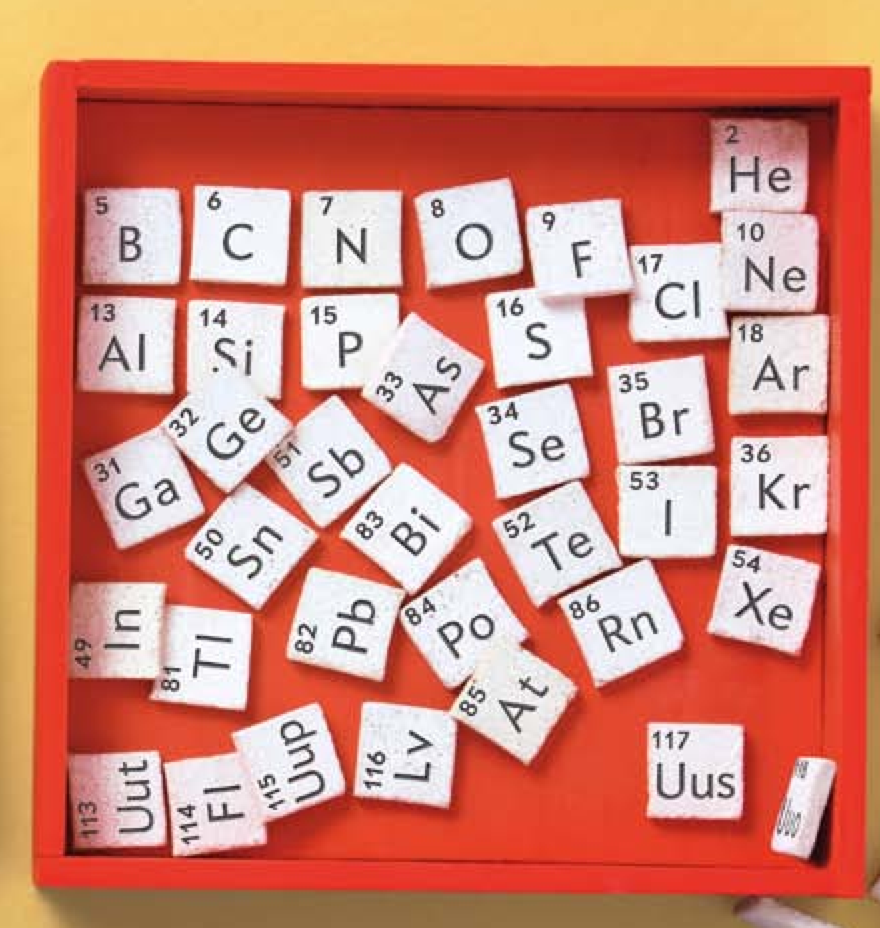
QUÍMICA

Fisuras en la tabla periódica

El descubrimiento del elemento 117 llenó el último hueco que quedaba en la tabla periódica. Sin embargo, ahora que se ha completado puede que esté perdiendo su valor

Eric R. Scerri


29 Cu
30 Zn
47 Ag
48 Cd
79 Au
80 Hg
111 Rg
112 Cn


2 He
5 B
6 C
7 N
8 O
9 F
10 Ne
13 Al
14 Si
15 P
16 S
17 Cl
18 Ar
31 Ga
32 Ge
33 As
34 Se
35 Br
36 Kr
49 In
50 Sn
51 Sb
52 Te
53 I
54 Xe
81 Tl
82 Pb
83 Bi
84 Po
85 At
86 Rn
113 Uut
114 Fl
115 Uup
116 Lv
117 Uus


61 Pm
62 Sm
63 Eu
64 Gd
65 Tb
66 Dy
67 Ho
68 Er
69 Tm
70 Yb
93 Np
94 Pu
95 Am
96 Cm
97 Bk
98 Cf
99 Es
100 Fm
101 Md
102 No

Eric R. Scerri, doctor en historia y filosofía de la ciencia por el King's College de Londres, es historiador y filósofo de la química en la Universidad de California en Los Ángeles. Fundador y director de la revista *Foundations of Chemistry*, ha publicado numerosos artículos y libros sobre la tabla periódica.





VESTIGADORES RUSOS ANUNCIARON EN 2010 QUE HABÍAN SINTETIZADO POR PRIMERA vez unos pocos núcleos del elemento 117. Este nuevo tipo de átomo no tenía todavía nombre, porque tradicionalmente la comunidad científica espera a tener una confirmación independiente antes de bautizar un nuevo elemento. Pero, salvo sorpresas, el 117 ocupa ya una plaza permanente en la tabla periódica de los elementos.

Todos los elementos hasta el 116, y el 118, habían sido previamente encontrados; el 117 llenó el último hueco que quedaba en la fila inferior. Este logro marca un hito en la historia. Cuando Dimitri Mendeléiev —también ruso— y otros científicos crearon la tabla periódica en los años sesenta del siglo XIX, generaron el primer gran esquema para organizar todos los elementos conocidos en aquel momento. Mendeléiev dejó algunos espacios en blanco en su tabla y formuló la audaz suposición de que algún día se descubrirían nuevos elementos que llenarían aquellos vacíos. Se han elaborado incontables revisiones de la tabla, pero nunca se había podido prescindir de los huecos... hasta ahora. Con el elemento 117 la tabla periódica de los elementos se ha completado por primera vez.

El espíritu de Mendeléiev probablemente saboreará el triunfo de su visión, por lo menos por un tiempo, hasta que los químicos y los físicos nucleares sinteticen nuevos elementos, que requerirán la adición de nuevas filas y posiblemente dejarán nuevos huecos.

Sin embargo, en el momento en que encajaban las últimas piezas del rompecabezas, empezó a sospecharse que algo fundamental fallaba. Algo que podría minar la misma base de la existencia de la tabla periódica: los patrones recurrentes que le dan nombre.

Mendeléiev no solo predijo la existencia de elementos que todavía no se habían detectado, sino que pronosticó, con acierto, las propiedades químicas de estos, basándose en las pautas recurrentes —lo cual es un hecho aún más notable—. Pero conforme los números atómicos (el número de protones de un núcleo) iban aumentando, algunos de los elementos añadidos ya no se comportaban del modo que la ley periódica pronosticaba; sus interacciones químicas, como los enlaces que forman con otros átomos, no se parecían a las de los otros elementos de la misma columna. La razón estriba en que algunos de los electrones que orbitan alrededor de los núcleos más pesados alcanzan velocidades que se aproximan a la de la luz. Devienen, en términos físicos, «relativistas», siendo ello la causa de que el comportamiento de los átomos difiera de lo que se espera según su posición en la tabla. Es más, la predicción de la estructura orbital exacta de cada átomo entraña una gran complejidad. Así, aunque la obra de Mendeléiev se ha completado de forma exitosa, puede haber empezado a perder su poder explicativo y predictivo.

UN ÉXITO ABSOLUTO

Aunque hasta ahora se han publicado más de 1000 versiones de la tabla periódica, con variaciones en el orden de los elementos, así como en los propios elementos que contenían, todas poseían una característica común. Cuando los elementos se hallan ordenados de forma secuencial, según su número atómico (si bien los primeros intentos de ordenación usaban el peso atómico), las propiedades químicas tienden a repetirse después de una secuencia de elementos determinada. Si empezamos por el litio y nos desplazamos hacia adelante ocho casillas, encontramos el sodio, que comparte con aquel numerosas propiedades: ambos corresponden a metales blandos que se pueden cortar con un cuchillo y ambos reaccionan enérgicamente con el agua. Si nos desplazamos ocho casillas más adelante, llegamos al potasio, que también es blando y reacciona con el agua, y así sucesivamente.

En las primeras tablas periódicas, incluidas las diseñadas por Mendeléiev pero también las de otros, la longitud de cada período —y, por tanto, la de cada fila— era siempre de ocho. Sin embargo, pronto se vio que en el cuarto y el quinto período las propiedades no se repetían cada ocho elementos, sino cada dieciocho. La cuarta y la quinta filas de la tabla debían, pues, ser más anchas que las anteriores, para dar cabida al bloque extra de elementos: los metales de transición, que en la representación habitual de la tabla periódica se ubican en el centro. El sexto período resultó ser incluso más largo, de 32 elementos, a cau-

EN SÍNTESIS

El descubrimiento del elemento 117 en 2010 completó por primera vez la tabla periódica tal como la conocemos, al menos hasta que nuevos descubrimientos obliguen a añadirle una nueva fila.

Sin embargo, la química de algunos elementos de incorporación reciente puede diferir de la de los elementos de la misma columna, rompiendo la regla periódica que había caracterizado la tabla durante un siglo y medio.

Este sorprendente comportamiento puede derivar de los efectos descritos por la teoría de la relatividad especial, que hacen que ciertos electrones orbiten de forma más compactada.

Los físicos nucleares siguen en su empeño por sintetizar nuevos elementos, que tendrán nuevos tipos de orbitales electrónicos, y por comprender su química mediante el estudio de un puñado de átomos efímeros.

Una vitrina de maravillas químicas en continua ampliación

La tabla periódica organiza los elementos según patrones recurrentes de sus propiedades químicas. Estas están determinadas por los orbitales «órbitas» de los electrones del átomo dispuestos alrededor del núcleo; en concreto, por los más externos. Si nos movemos de los números atómicos bajos a los más altos, las estructuras de los orbitales externos cambian de forma recurrente, con una pauta periódica. Los elementos entre el 5 y el 10 poseen orbitales externos de la familia p, y pasa lo mismo para los elementos entre el 13 y el 18; de ahí que todos estos elementos pertenezcan al mismo «bloque p» (*azul*).

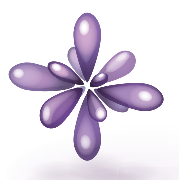
Ejemplos de estructuras: El litio (Li) tiene dos orbitales s con tres electrones en total (*no mostrados*). El boro (B) posee dos orbitales s, con cuatro electrones en total, y un orbital p exterior con un electrón.

Nuevos bloques

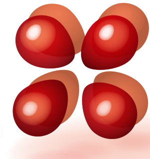
Esta disposición corresponde a la tabla «escalonada por la izquierda» de Janet, por su autor Charles Janet. La fila inferior se completará cuando se descubran los elementos 119 y 120, cuyos orbitales son de tipo s. El elemento 121 será el primero con orbitales de una nueva familia, g, por lo que se ubicará en un bloque absolutamente nuevo.

Bloque g	Bloque f	Bloque d	Bloque p	Bloque s
				H 1, He 2
				Li 3, Be 4
			B 5, C 6, N 7, O 8, F 9, Ne 10	Na 11, Mg 12
			Al 13, Si 14, P 15, S 16, Cl 17, Ar 18	K 19, Ca 20
		Sc 21, Ti 22, V 23, Cr 24, Mn 25, Fe 26, Co 27, Ni 28, Cu 29, Zn 30	Ga 31, Ge 32, As 33, Se 34, Br 35, Kr 36	Rb 37, Sr 38
		Y 39, Zr 40, Nb 41, Mo 42, Tc 43, Ru 44, Rh 45, Pd 46, Ag 47, Cd 48	In 49, Sn 50, Sb 51, Te 52, I 53, Xe 54	Cs 55, Ba 56
	La 57, Ce 58, Pr 59, Nd 60, Pm 61, Sm 62, Eu 63, Gd 64, Tb 65, Dy 66, Ho 67, Er 68, Tm 69, Yb 70	Lu 71, Hf 72, Ta 73, W 74, Re 75, Os 76, Ir 77, Pt 78, Au 79, Hg 80	Tl 81, Pb 82, Bi 83, Po 84, At 85, Rn 86	Fr 87, Ra 88
	Ac 89, Th 90, Pa 91, U 92, Np 93, Pu 94, Am 95, Cm 96, Bk 97, Cf 98, Es 99, Fm 100, Md 101, No 102	Lr 103, Rf 104, Db 105, Sg 106, Bh 107, Hs 108, Mt 109, Ds 110, Rg 111, Cn 112	Uut 113, Fl 114, Uup 115, Lv 116, Uus 117, Uuo 118	119, 120
121, 122				

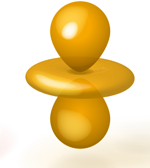
Cada dos períodos y, por tanto, cada dos filas, aparece una nueva familia de orbitales electrónicos. A la derecha se muestran ejemplos de las formas de los orbitales, uno de cada familia.



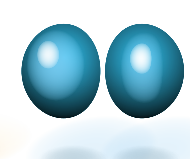
Orbital de tipo g



Orbital de tipo f



Orbital de tipo d



Orbital de tipo p



Orbital de tipo s

JEN CHRISTIANSEN

sa de la inclusión de una serie de 14 elementos llamados lantánidos —rebautizados en fecha más reciente como lantanoides.

En 1937 los físicos nucleares empezaron a sintetizar nuevos elementos, empezando por el tecnecio. Este llenó uno de los cuatro huecos de la tabla, que entonces se extendía del 1 (hidrógeno) al 92 (uranio). Pronto le siguieron las otras tres piezas que faltaban, dos de ellas sintetizadas (ástato y prometio) y la tercera encontrada en la naturaleza (francio). Pero, en el mismo momento en que se llenaron estos vacíos, se añadieron nuevos hallazgos a la tabla periódica más allá del uranio, dejando nuevos huecos.

El químico estadounidense Glenn Seaborg se dio cuenta de que el actinio, el torio y el protactinio, junto con el uranio y los diez elementos siguientes, formaban parte de una nueva serie, que, como la de los lantanoides, contaba con catorce elementos; se la denominó serie de los actínidos o actinoides. Dado que los elementos adicionales de estas dos series ensancharían la tabla aún más, las versiones estándar presentan las dos series de catorce elementos en bloques separados al pie de la misma.

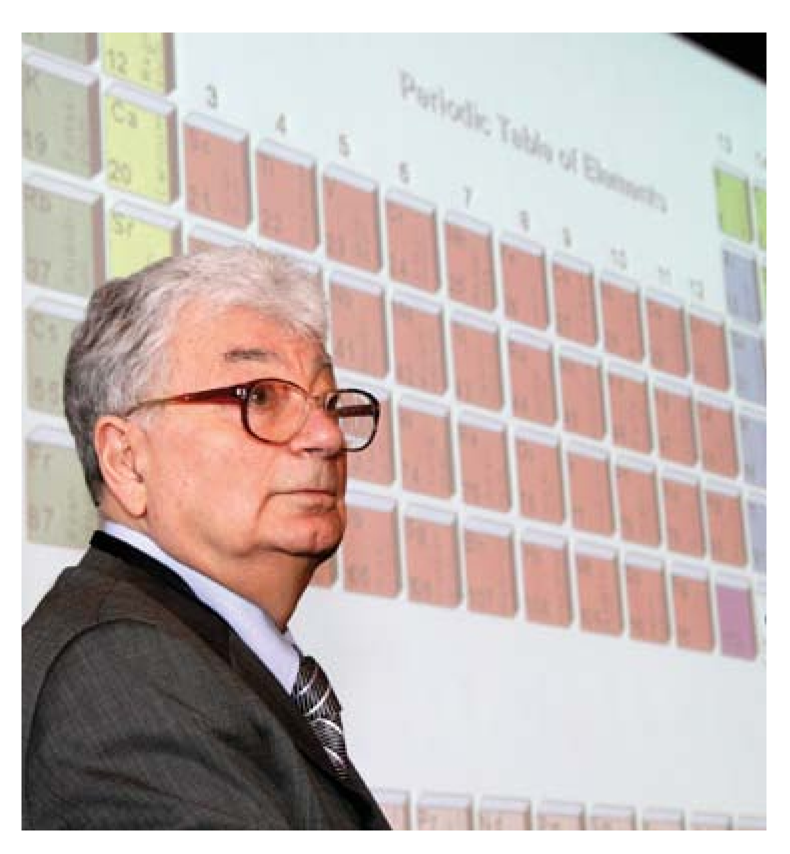
Tal como los científicos constataron en la primera mitad del siglo xx, la periodicidad de los elementos hunde sus raíces en la física cuántica; en particular, en la física que describe el movimiento de los electrones alrededor del núcleo. Las órbitas de los electrones se caracterizan por un abanico de formas y medidas discretas. Los átomos con número atómico elevado poseen los mismos tipos de órbitas, u orbitales, que los de números bajos, pero cuentan, además, con otros tipos adicionales de orbitales. Los elementos del primer período poseen solo un tipo de orbital, llamado s, que puede estar ocupado por uno o dos electrones (uno en el hidrógeno; dos en el helio). En los elementos del segundo y tercer período se añaden, en cada uno, otro orbital s y tres orbitales de un tipo nuevo, p. Al igual que antes, cada uno de esos cuatro orbitales puede estar ocupado por uno o dos electrones, hasta un máximo de ocho, lo que da lugar a la periodicidad de ocho en las primeras versiones de la tabla. El cuarto y quinto períodos tienen, además de los orbitales s y p, uno de tipo d, que añade diez posiciones más para los electrones; de aquí que estos períodos se amplíen a dieciocho casillas. Finalmente, los dos últimos ciclos poseen orbitales de tipo s, p, d y f, y tienen una longitud de 32 elementos (18 + 14).

Cuando Yuri Oganessian y sus colaboradores, del Instituto Joint de Investigación Nuclear, cerca de Moscú, anunciaron que habían sintetizado el escurridizo elemento 117, la última fila quedó completa. La estrecha conexión entre la estructura de los átomos y la de la tabla significa que la finalización de esta no fue puramente una cuestión de estética o de organización de la información sobre el papel. El elemento 118 es el único con todos sus orbitales s, p, d y f totalmente ocupados por electrones.

Si alguna vez se sintetizan más elementos, ocuparán una fila nueva. El 119, que es el más probable que aparezca a continuación (*véase el recuadro* «Una vitrina de maravillas químicas en continua ampliación»), empezaría un nuevo ciclo, otra vez con el más simple de los orbitales, el s. El elemento 119 y el siguiente, el 120, ocuparían los dos primeros huecos en el nuevo octa-

vo período. Pero con el elemento 121 empezaría, al menos en principio, un bloque completamente nuevo, con orbitales nunca encontrados antes: los g. Como antes, los nuevos tipos de orbitales añaden posibilidades para los electrones y de este modo alargan la periodicidad, aumentando el número de columnas. Este bloque de elementos ampliaría la tabla hasta cincuenta columnas, aunque los químicos ya han concebido formas más compactas de ordenar una distribución tan extensa.

Una tabla completa (con todas sus filas llenas) podría parecer el último logro del sueño de Mendeléiev. Y podría haberlo sido, pero no lo fue a causa de la teoría especial de la relatividad de Albert Einstein.



Yuri Oganessian lideró el equipo que creó el elemento 117. Ahora está empezando a trabajar para acometer la síntesis del siguiente elemento, el novedoso 119.

CORTESÍA DEL LABORATORIO FLEROV

ELECTRONES RELATIVISTAS

Conforme pasamos de números atómicos más bajos a valores más altos, la carga del núcleo crece por los protones adicionales. Al aumentar la carga nuclear, lo hace también la velocidad de los electrones en los orbitales internos, hasta el punto de que la teoría especial de la relatividad empieza a cumplir una función mayor a la hora de explicar su comportamiento. Ello provoca una contracción en el tamaño de los orbitales interiores y los hace más estables. Esta compactación se «contagia» a los orbitales s y p, que también se constriñen, incluidos los orbitales de valencia (externos), que son los que determinan las propiedades químicas.

Todos esos fenómenos se agrupan bajo el nombre de efecto relativista directo, que, en términos generales, aumenta con la carga del núcleo de cada átomo. No obstante, algunos fenómenos en competencia con este hacen que las cosas sean más complejas. Mientras el efecto relativista directo estabiliza ciertos orbitales, el efecto relativista «indirecto» desestabiliza los orbitales d y f. Se trata de un tipo de apantallamiento electrostático ejercido por los electrones s y p, cuyas cargas negativas neutralizan parcialmente la atracción de la carga positiva del núcleo medida desde puntos más distantes. De este modo, para los electrones lejanos el núcleo parece ejercer menos, y no más, atracción electrostática.

Algunos efectos relativistas de los elementos se observan en la vida diaria. El oro les debe su color, que lo distingue de los elementos incoloros que lo rodean en el bloque d de la tabla periódica —como la plata, que se halla justo encima.

Un átomo de un metal del bloque d sufre una transición cuando recibe un fotón de la longitud de onda adecuada. Al absorber dicho fotón, la energía de este hace saltar un electrón de un orbital d al orbital s justo encima de él. En la plata, la brecha energética de los orbitales es bastante grande, de manera que para desencadenar la transición se necesita un fotón de la región ultravioleta del espectro; los fotones de luz visible, en cambio, al ser menos energéticos que los ultravioletas, simplemente rebotan. A ello se debe que, ante nuestros ojos, el material parezca un espejo casi perfecto.

En el oro, la contracción relativista reduce la energía de los orbitales s al mismo tiempo que aumenta la de los orbitales d, de modo que se estrecha la brecha que los separa. En tal situación la transición requiere menos energía, exactamente la que posee un fotón de la zona azul del espectro. Sin embargo, los fotones de todos los demás colores rebotan, por lo que observamos luz blanca sin su componente azul: el característico amarillo dorado.

Pekka Pyykkö, de la Universidad de Helsinki, y otros investigadores fueron los primeros en predecir algunos de los efectos que la relatividad tiene sobre el oro; entre otros, la posibilidad de unirse, de formas sorprendentemente nuevas, con otros átomos. Los compuestos que esperaban obtener de estas interacciones fueron descubiertos posteriormente, una proeza equiparable a la hazaña de Mendeléiev cuando vaticinó la existencia de nuevos elementos. Entre las exitosas predicciones de Pyykkö figuraban enlaces entre el oro y el gas noble xenón, que por lo general es extraordinariamente inerte, y triples enlaces entre el oro y el carbono. Otro éxito corresponde a la predicción de una molécula esférica que consta de un átomo del metal wolframio y doce átomos de oro, y que se parece a los fullerenos (también conocidos como buckybolas o futbolenos), constituidos solo por carbono. Este fullereno de oro se forma casi espontáneamente cuando se vaporizan wolframio y oro en presencia de helio.

Los cálculos de mecánica cuántica relativista también han resultado indispensables para estudiar cómo los agregados de oro pueden actuar a modo de catalizadores (por ejemplo para descomponer las sustancias tóxicas que emanan del tubo de escape de un coche), a pesar de que un trozo de oro macizo es notoriamente inerte.

SORPRESAS SUPERPESADAS

Incluso con la aparición de los efectos relativistas, elementos como el oro no se desvían demasiado del comportamiento que

se espera de ellos. Hasta hace poco, los nuevos elementos en general se ajustaban a las propiedades que se habían anticipado a partir de la posición que ocupaban en la tabla periódica. Pero todavía quedaban por venir las peores sorpresas, que quizá sean las más interesantes. Algunos ensayos sobre la química de los elementos descubiertos en fecha reciente han empezado a mostrar lo que podrían llegar a ser graves fisuras en la ley periódica.

Haciendo chocar núcleos pesados, mediante aceleradores de partículas, los físicos nucleares pueden obtener elementos «superpesados» (los de número atómico superior a 103). Los primeros experimentos realizados en los años noventa con el rutherfordio (104) y el dubnio (105) ya sugerían que estos elementos no tenían las propiedades esperadas de acuerdo con sus posiciones en la tabla periódica. Ken Czerwinski y sus colegas, de la Universidad de California en Berkeley, encontraron que, en disolución, el rutherfordio reaccionaba de manera similar al plutonio, elemento del que se encuentra bastante lejos en la tabla periódica. Igualmente el dubnio mostró indicios de comportarse como el protactinio, que, de nuevo, es más bien distante. En cambio, de acuerdo con la ley periódica, estos dos elementos deberían haberse comportado como los que se hallan justo encima de ellos, el hafnio y el tántalo.

Todavía no está claro si para los átomos muy pesados sigue siendo válido el principio de que los elementos de cada columna de la tabla periódica se comportan de forma semejante

En estudios más recientes, se han sintetizado nuevos elementos superpesados en cantidades muy reducidas: el descubrimiento del 117 se basó en la observación de tan solo seis átomos. Los elementos superpesados también tienden a ser muy inestables; se desintegran en elementos más ligeros en una fracción de segundo. Lo más que pueden hacer los científicos es observar los restos de la desintegración nuclear, que ofrece información sobre la física y la química de los núcleos. Por tanto, resulta imposible investigar las propiedades de estos elementos mediante la química «húmeda» tradicional (poner la sustancia en un recipiente y hacerla reaccionar con otros productos). Con todo, se han desarrollado ingeniosas técnicas para estudiar la química de estos elementos átomo por átomo.

Los experimentos llevados a cabo con los dos elementos siguientes fueron decepcionantes si los comparamos con los realizados con el 104 y el 105. El seaborgio (106) y el bohrio (107) parecían actuar exactamente como Mendeléiev habría supuesto, lo que animó a los investigadores a darles nombres tales como «el extrañamente vulgar seaborgio» (*oddly ordinary seaborgium*) y «el aburrido bohrio» (*boring bohrium*) en sus artículos. La ley periódica parecía haber vuelto a su redil.

En el caso del elemento 112, los químicos y los físicos han estado intentando evaluar si se comporta como el mercurio, que se halla justo encima en la tabla periódica, o más bien como el gas noble radón, tal como predicen los cálculos relativistas. En estos experimentos, se sintetizan átomos de 112, junto con algunos isótopos pesados de mercurio y de radón. (Si bien el mercurio y el radón existen en la naturaleza en cantidades considerables, los investigadores prefieren sintetizarlos porque pueden producirse en condiciones idénticas a las de los elementos más pesados, lo cual es mejor que fiarse de los datos de propiedades macroscópicas de los elementos más ligeros y mucho más abundantes.)

Después de la colisión, se dejan depositar todos los átomos obtenidos sobre una superficie a temperatura muy baja y recubierta en parte con oro y en parte con hielo. Si el elemento 112 se comportara verdaderamente como un metal, se uniría al oro. Si fuera más parecido al gas noble radón tendería a depositarse sobre el hielo. Por ahora, distintos laboratorios han obtenido resultados diferentes; la situación está todavía lejos de esclarecerse.

Los efectos de la relatividad sobre el elemento 114 están por ver. Los resultados iniciales presentados por Robert Eichler y su grupo, del Instituto Paul Scherrer de Suiza, apuntan a algunas auténticas sorpresas en este punto, dado que el desacuerdo con la teoría es notable.

Seguramente habrá nuevas incorporaciones a la tabla periódica, y la investigación sobre la química de estos elementos ayudará a resolver el dilema. Una cuestión más general es si la tabla periódica tiene un final. El consenso general es que, cuando el número de protones sea demasiado grande, los núcleos no se formarán, ni siquiera durante un breve instante. Pero las opiniones parecen diferir sobre la posición de este valor umbral, a partir del cual no habrá ya elementos nuevos. En los cálculos que suponen que el núcleo es un pequeño punto compacto, el límite parece hallarse en el elemento 137. Otros expertos que han tomado en consideración el volumen del núcleo estiman que el último elemento tendrá un número atómico de 172 o 173.

Todavía no está claro si el principio de que los elementos de la misma columna de la tabla periódica se comportan de forma similar sigue siendo válido para los átomos muy pesados. Sin embargo, esta cuestión no entraña consecuencias prácticas relevantes, al menos para el futuro inmediato. La pérdida del poder de predicción en la zona de los superpesados no afectará a la utilidad del resto de la tabla. El químico típico nunca llegará a trabajar con ninguno de los elementos de números atómicos más altos: los núcleos de estos son muy inestables, lo que significa que se descomponen dando lugar a elementos más ligeros instantes después de ser creados.

No obstante, la cuestión del efecto de la relatividad especial ataca el mismo corazón de la química como disciplina. Si la ley periódica pierde su capacidad predictiva, la química será en cierto sentido más dependiente de la física, mientras que si se mantiene la ley periódica en su forma clásica, seguirá con un cierto grado de independencia. Mientras tanto, quizás el fantasma de Mendeléiev debería simplemente volver la vista atrás y maravillarse del éxito de su invento favorito.

PARA SABER MÁS

La tabla periódica. Eric R. Scerri en *Investigación y Ciencia*, abril de 2008.
A suggested periodic table up to Z ≥ 172, based on Dirac-Fock calculations on atoms and ions. Pekka Pyykkö en *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 13, n.º 1, págs. 161-168; 2011.
A very short introduction to the periodic table. Eric Scerri. Oxford University Press; 2011.
A tale of seven elements. Eric Scerri. Oxford University Press; 2013.

Kendra Sewall es bióloga e investigadora en la Universidad Duke y en la de Carolina del Norte en Chapel Hill. Su trabajo se centra en la comunicación y el comportamiento social en las aves de canto.



ETOLOGÍA

Imitación vocal en el mundo animal

La imitación de las llamadas de los miembros del grupo y las parejas indica la existencia de vínculos sociales en algunas especies

Kendra Sewall

A MENUDO, NOS BASTA CON OÍR HABLAR A UNA PERSONA PARA RECONOCER SU PAÍS o región de procedencia. Solemos hacerlo sin pensar, gracias a indicios como el dejo y el vocabulario que caracterizan los dialectos regionales. Con frecuencia descubrimos también pistas sobre su identidad social: las personas pertenecientes a clases socioeconómicas o grupos de edad distintos utilizan a veces inflexiones o entonaciones diferentes, aunque hablen la misma variante lingüística. Por ejemplo, en la versión original de la película *El indomable Will Hunting*, los personajes de las universidades de Boston hablan con un acento distinto al de los habitantes del barrio obrero de Boston Sur. El reparto al completo tuvo que adoptar un acento regional, pero los actores imitaron con sutileza las diversas versiones propias del colectivo representado por su personaje.

El fenómeno por el cual los naturales de una región geográfica o los integrantes de un grupo social comparten características vocales no es exclusivo de los humanos. Tales peculiaridades aparecen también en las especies animales que utilizan un lenguaje vocal. Su aprendizaje consiste en la producción de una vocalización a partir de los sonidos escuchados. Se trata de un rasgo poco frecuente en el reino animal, pues solo ha sido confirmado en aves, cetáceos, murciélagos, elefantes y algunos primates. Pero a pesar de que la mayoría de los animales quizá no necesite ninguna experiencia social para proferir las llamadas propias de su especie, un puñado de ellos las adquiere a través del aprendizaje. Numerosas especies practican también la imitación vocal, esto es, la emulación del canto de sus congéneres con el propósito de producir señales con una estructura acústica

EN SÍNTESIS

Aparte de los humanos, numerosos animales utilizan vocalizaciones para comunicarse. Además, algunas especies imitan las llamadas de sus congéneres. Se ha observado que esta estrategia confiere importantes ventajas, con un aumento de la capacidad reproductora y la supervivencia de los individuos.

Emular la llamada de los semejantes mejora la comunicación con la pareja y la atención de las crías, facilita el contacto con otros miembros del grupo y refuerza los lazos sociales, lo que ayuda a obtener recursos alimentarios y a acceder a las comunidades.

Los animales que practican la imitación vocal se comunican mejor con los compañeros en entornos sociales complejos y ruidosos, lo que contribuye a aumentar la eficacia biológica de la especie.

CATHY & GORDON ILLG



Una jauría de coyotes (*Canis latrans*) aúlla al atardecer en el Valle de la Muerte, en el desierto de Mojave, en California. El coyote se cuenta entre las especies dotadas de un repertorio de reclamos para diferentes contextos sociales. Las llamadas, definidas por Brian Reid Mitchell, de la Universidad de California en Berkeley, incluyen un ladrido, un ladrido-aullido, un aullido, un aullido de grupo y un gañido-aullido de grupo.



Las orcas (*Orcinus orca*) forman pequeños grupos sociales o manadas cuyos miembros exhiben llamadas comunes que aprenden por imitación. Esta estrategia podría ayudarlas a cazar en grupo y a localizar a sus compañeros y mantenerse cerca de ellos. Las manadas de una región forman un clan. Los miembros del clan emiten llamadas propias de este, pero también profieren otras que solo comparten con compañeros de la manada. Así pues, las vocalizaciones aprendidas por las orcas constituyen un reflejo de la pertenencia a un clan y a una manada.

FRANCOIS GOHIER, PHOTO RESEARCHERS

similar. La constatación de la imitación vocal en especies muy diferentes sugiere que este rasgo inusual tal vez desempeñe una importante función social en el mundo animal. De igual forma que ciertos matices del habla humana denotan la clase social y la región de origen, las características comunes de las señales de comunicación animal podrían reflejar aspectos del origen social de los individuos, puesto que los sonidos emulados resultan propios de una especie, subespecie, población, grupo social, familia o pareja.

La orca (*Orcinus orca*) es un cetáceo gregario que imita vocalizaciones. Los estudios realizados por Volker Deecke, de la Universidad de St. Andrews en Escocia, y el grupo de John Ford, de la Universidad de la Columbia Británica, han demostrado que las manadas que viven en una región geográfica, emparentadas entre sí y englobadas en clanes, emiten una serie de sonidos comunes. Las semejanzas entre ellos dan como resultado un dialecto vocal, análogo al acento humano, que refleja el linaje de los animales y la pertenencia a un grupo dado. No obstante, las llamadas de los compañeros de la manada comparten más semejanzas que los dialectos del clan, lo que permite a los investigadores averiguar a qué grupo social pertenece una ballena, así como su procedencia.

Este ejemplo demuestra que las vocalizaciones adquiridas por imitación podrían reflejar la identidad social del individuo. Sin embargo, no cabe esperar que los animales presten atención o respondan a esas llamadas a menos que ello mejore sus posibilidades de supervivencia y procreación (lo que los biólogos evolucionistas denominan eficacia biológica). Esto es, a diferencia de los complejos factores sociales que influyen en los patrones de similitud lingüística en los humanos, el estudio de la imitación vocal en los animales requiere sobre todo evaluar el efecto del comportamiento en medidas relacionadas con la eficacia biológica de los individuos, puesto que los rasgos de los animales están modelados por la selección natural y sexual.

UNA LLAMADA PARA CADA OCASIÓN

¿Por qué animales tan dispares imitan las vocalizaciones de sus congéneres? La mayoría de los que lo hacen realizan llamadas de contacto. Suelen utilizar reclamos compuestos por sonidos y estructuras particulares que varían según las circunstancias. Muchas personas conocen los chillidos de alarma de la ardilla cuando divisa un depredador o el ladrido agresivo de los leones marinos cuando entran en disputa por un espacio en los muelles de San Francisco. Los animales emiten las llamadas cuando desean entablar y mantener el contacto con sus congéneres mientras se desplazan por su hábitat o cuando pretenden reunirse tras una separación.

Aunque numerosas especies profieren llamadas de contacto, aquellas que imitan las de sus congéneres son, en su inmensa mayoría, muy sociables. Cooperan para buscar o defender el alimento, cuidar a sus crías o mantener a raya a los depredadores. Al examinar varios estudios se observa que las especies con una dinámica social parecida coinciden en este tipo de reclamos que median las relaciones sociales. Tal descubrimiento aporta una primera prueba de que la imitación vocal ofrecería un beneficio real al individuo. Los patrones comunes de conducta vocal, ecología y sociabilidad sugieren que la capacidad de aprender e imitar las llamadas constituye un carácter adaptativo seleccionado bajo unas condiciones ambientales concretas. Es más, el hecho de que la imitación se produzca a menudo entre los miembros de grupos sociales que cooperan o entre los progenitores que comparten el cuidado de los retoños corrobora la idea de que tal estrategia facilita las relaciones de colaboración y ayuda mutua.

El vínculo entre la imitación vocal y la cooperación resulta intuitivo porque los humanos imitamos el acento y la entonación de otras personas. Esta adaptación vocal, como la denominan los expertos en lingüística, se granjea la confianza del oyente a la par que mejora su comprensión de lo que escucha, dándole a entender una intención de cooperación y afiliación. ¿Pero qué pruebas existen de que los animales mejoran sus posibilidades de supervivencia o reproducción al imitar las llamadas de la pareja, de los miembros del grupo o de otros congéneres?

La imitación vocal tal vez aporte una ventaja universal: los receptores reconocen mejor los reclamos de los compañeros. Los datos aportados por los estudios con diversas especies indican que los sistemas de procesamiento auditivo de los animales resultan más sensibles a las señales que se asemejan a las propias. Varios investigadores afirman que la sensibilidad selectiva garantiza que los receptores capten y presten atención a las vocalizaciones. Por tanto, la imitación vocal aseguraría que un miembro del grupo oyera a otro o captara la atención de un tercero. Sería como cuando uno escucha su nombre entre el murmullo de una muchedumbre; nuestro sistema auditivo percibe esta información importante a pesar del ruido de fondo.

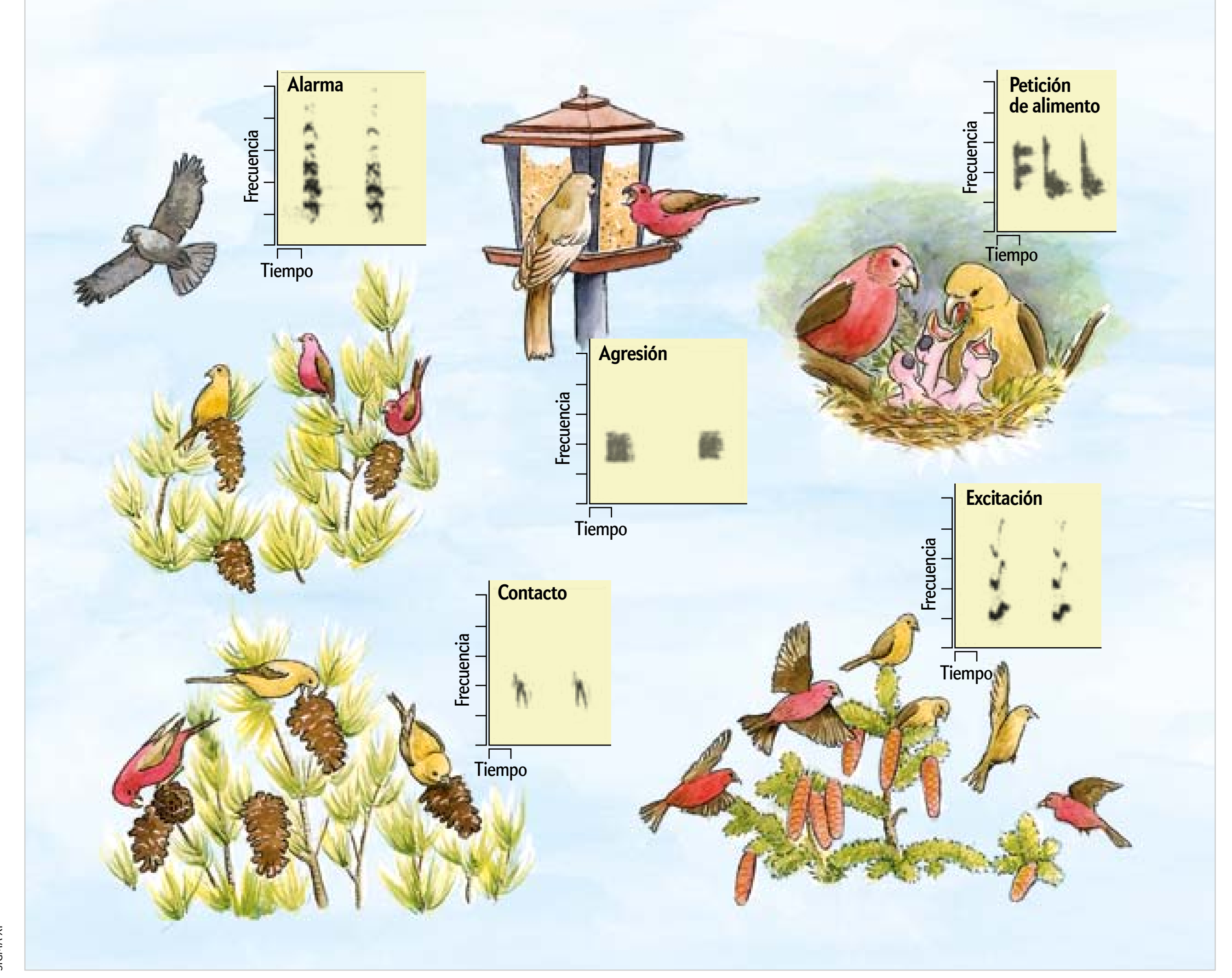
Los estudios etológicos llevados a cabo con la cotorrita de anteojos (*Forpus conspicillatus*) apuntan a que la imitación mejora la detección de las señales. Estos loritos sudamericanos viven en grupos de 10 a 25 individuos que en su mayoría comparten lazos de pareja o familiares. Ralf Wanker y su equipo de la Uni-

versidad de Hamburgo han descubierto que cada cotorrita posee su propia llamada de contacto, la llamada identitaria, pero también puede reproducir la de sus familiares cuando interactúa con ellos. En estudios con reproducción de sonidos (*playback*), los autores demuestran que las aves responden mejor a las imitaciones de su canto que a otras llamadas, lo que, según ellos, demuestra que la emulación consigue atraer la atención del receptor deseado. De manera similar, el repertorio del periquito común (*Melopsittacus undulatus*) incluye tanto llamadas identitarias como imitaciones de su pareja y de miembros de la bandada. Un estudio de neurobiología a cargo de Steven E. Brauth y sus colaboradores, de la Universidad de Maryland, constató que los patrones de actividad cerebral de los periquitos ante las llamadas de contacto que reproducían la propia llamada eran distintos de los desencadenados por otros cantos. Tal divergencia indica un procesamiento distinto de ambos tipos de estímulos en el cerebro y avala la hipótesis de que los individuos captan mejor las vocalizaciones similares a las suyas.

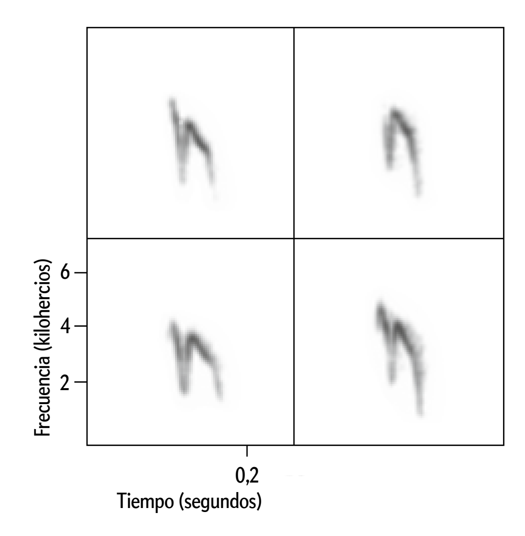
VARIEDAD DE CANTOS

Un reclamo para cada ocasión

Los reclamos desempeñan un papel esencial en las relaciones de numerosas especies sociales, como ballenas, delfines, focas, elefantes y primates, pero han sido estudiados sobre todo en las aves. Todos los animales que utilizan reclamos como medio de comunicación poseen un repertorio de vocalizaciones que emplean dependiendo de la situación. Aunque se llegó a pensar que los animales producían todos los sonidos de forma innata, sin necesidad de aprendizaje, cada vez existen más indicios de que al menos una parte es fruto de la experiencia. En el caso de las llamadas de contacto, empleadas por los animales para encontrar a la pareja y a los compañeros del grupo, numerosos datos indican que ciertas especies aprenden a modificar el sonido de sus reclamos para amoldarse a las condiciones sociales cambiantes. A continuación, se muestran varios tipos de llamadas del piquituerto común (*Loxia curvirostra*). Las de alarma se lanzan cuando se avista un depredador; las de agresión, en los conflictos sociales; las de excitación se suelen oír al descubrir una rica despensa o cuando acontecen cambios sociales; las de petición de alimento, cuando los jóvenes reclaman comida a los adultos; y las de contacto (que los piquituertos aprenden) para mantener el contacto con los compañeros.



SIGMA XI





Las vocalizaciones de los animales pueden representarse mediante espectrogramas, gráficos del tono de la señal (cuantificado en forma de frecuencia) en diferentes intervalos de tiempo. La fila superior del espectrograma (*arriba, izquierda*) corresponde a las llamadas de dos piquituertos comunes, que «hablan» el mismo dialecto, antes de formar una pareja (los dialectos son variantes de canto propias de una población). En la fila inferior, donde aparecen las llamadas de los mismos pájaros después de emparejarse, se aprecia la mayor similitud de las llamadas. Los dialectos de los piquituertos están vinculados a diferencias morfológicas y de especialización alimentaria en la especie, por lo que cualquier cambio en la estructura del canto resulta intrigante.

Estas observaciones refuerzan la idea de que la imitación vocal puede suponer una ventaja para los individuos que simulan las llamadas de sus congéneres, esto es, los emisores. Pero los beneficios de esta estrategia no explican por sí solos su presencia habitual en las especies con aprendizaje vocal. Por fuerza, las imitaciones deben perdurar porque también favorecen a los individuos que las escuchan y responden a ellas, es decir, los receptores. Si el emisor se aprovechara de la sensibilidad sensorial del receptor para manipularlo, cabría esperar que el individuo que respondiera a las imitaciones de sus reclamos acabaría perdiendo parte de su eficacia biológica y, en el decurso de las generaciones, terminaría por ignorar las llamadas. La persistencia de la imitación en las especies con aprendizaje vocal y la relación de este fenómeno con la afiliación y la cooperación llevan a pensar que, muy al contrario, debe beneficiar tanto al emisor como al receptor.

PAREJAS ESTABLES, LLAMADAS COMUNES

La imitación vocal surge sobre todo en las parejas reproductoras. Una de las ventajas que supuestamente ofrece a los pretendientes es la aceptación de su pareja y la oportunidad de procrear. Esta hipótesis está fundamentada en las descripciones de que los machos de ciertas especies, entre ellas el tití pigmeo (*Callithrix pygmaea*), el elefante africano (*Loxodonta africana*) y algunas aves, modifican sus llamadas para emular a las hembras, al parecer como parte del proceso de emparejamiento. Arla G. Hile y sus colaboradores, de la Universidad de California en Irvine, han descubierto que el periquito macho imita el canto de la hembra durante las semanas de cortejo y que sigue haciéndolo mientras dura la temporada de cría. El macho (emisor) obtiene beneficio de la imitación porque gana el favor de la hembra (receptora); esta lo obtiene a su vez porque la simulación indica el compromiso del macho de formar una pareja.

Los machos de varias especies emulan a las hembras para generar llamadas propias de la pareja, pero en ocasiones las hembras aprenden vocalizaciones nuevas, con el resultado de que ambos consortes acaban adoptando llamadas distintas a las originales. Así, un estudio realizado en 2009 por la autora de este artículo demostró que los machos y hembras del piquituerto común (*Loxia curvirostra*) de Norteamérica modificaban sus respectivos reclamos hasta crear uno nuevo, propio de la pareja. Este proceso de convergencia reflejaría un intento de reforzar el vínculo social, más que el afán de un miembro por atraer al otro.

Sea cual sea el modo en que surjan, las llamadas comunes de las parejas no solo fortalecen el vínculo social, sino que también ayudan a coordinar el cuidado de las crías, lo que aumenta el éxito reproductivo al mejorar la supervivencia de la progenie. Un indicio de que las llamadas imitadas podrían mejorar la atención parental es que este fenómeno suele aparecer en especies en las que ambos progenitores cuidan a sus retoños.



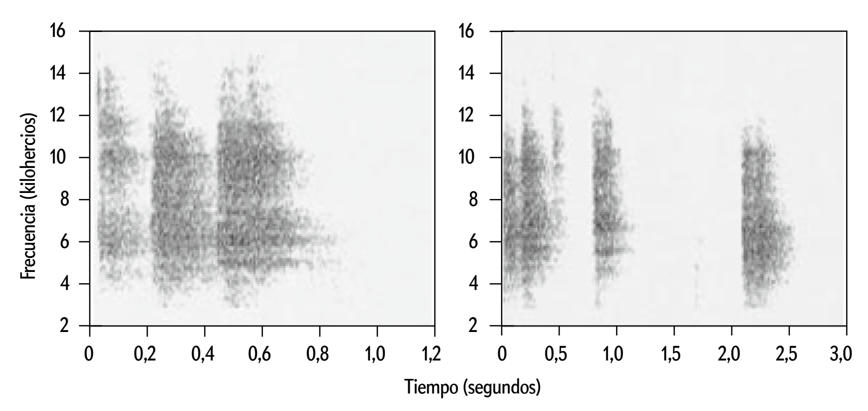
Se cree que los machos de tití pigmeo (*Callithrix pygmaea*) modifican sus reclamos para imitar los de su consorte. El proceso de adaptación de las vocalizaciones puede durar varias semanas y correspondería a una parte importante del proceso de formación de la pareja. Los tities pigmeos habitan en la cuenca del Alto Amazonas, en Sudamérica.

KENDRA SEWALL (*espectrograma*); CHRISTINE PENTECOST, BRIDGER MOUNTAIN PHOTO (*piquituertos*); GREGORY G. DIMIJIAN, M.D., PHOTO RESEARCHERS (*tities*)

Un ejemplo clásico, descrito por Paul Mundinger del Colegio Queens en Nueva York, lo protagoniza el macho del jilguero (*Carduelis* spp.), que, como tantas otras aves canoras de climas templados, nutre a la hembra durante la incubación y después a los polluelos. Cuando regresa con comida, el macho imita la llamada de contacto de su compañera y esta abandona brevemente el nido para recibir el alimento. En el estudio de Mundinger, las hembras de jilguero escucharon grabaciones de sus parejas y de otros machos vecinos, pero solo se acercaron al altavoz y reclamaron alimento cuando sonaba el canto de su compañero. No sabemos si las parejas que imitan mejor los respectivos reclamos tienen más éxito reproductivo, pero el patrón de conducta implica la existencia de llamadas comunes para coordinar el cuidado de las crías y mejorar así la eficacia biológica de los progenitores.

En algunas especies, los jóvenes aprenden también a imitar a los padres y se crean reclamos propios de la familia, lo que ayuda a reunir ambas partes cuando los adultos regresan de buscar alimento. La emulación dentro de la familia beneficiaría a los progenitores porque aumentaría su éxito reproductivo; pero también a la descendencia, porque cuando sus progenitores la encuentran recibe alimento, con lo que sus posibilidades de supervivencia aumentan. En 1980, Ian Rowley, de la Organización de Investigación Científica e Industrial de la Mancomunidad Británica de Naciones (CSIRO, por sus siglas en inglés), en Australia, descubrió que los miembros de la pareja de las cacatúas galah (*Eolophus roseicapilla*) adoptaban reclamos comunes y los pollos los aprendían. Las cacatúas se congregan en dormideros multitudinarios y anidan en oquedades, por lo que los progenitores pueden tener dificultades para encontrar el nido. Los pollos llaman a sus padres cuando los oyen acercarse, lo que ayuda a localizarlos y estimula la ceba. Y, cuando crecidos, los volantones comienzan a deambular por la colonia mientras sus padres andan buscando el sustento, la llamada común adquiere mayor importancia aún, pues ayuda a las familias a reunirse en el ambiente populoso y ruidoso en el que viven.





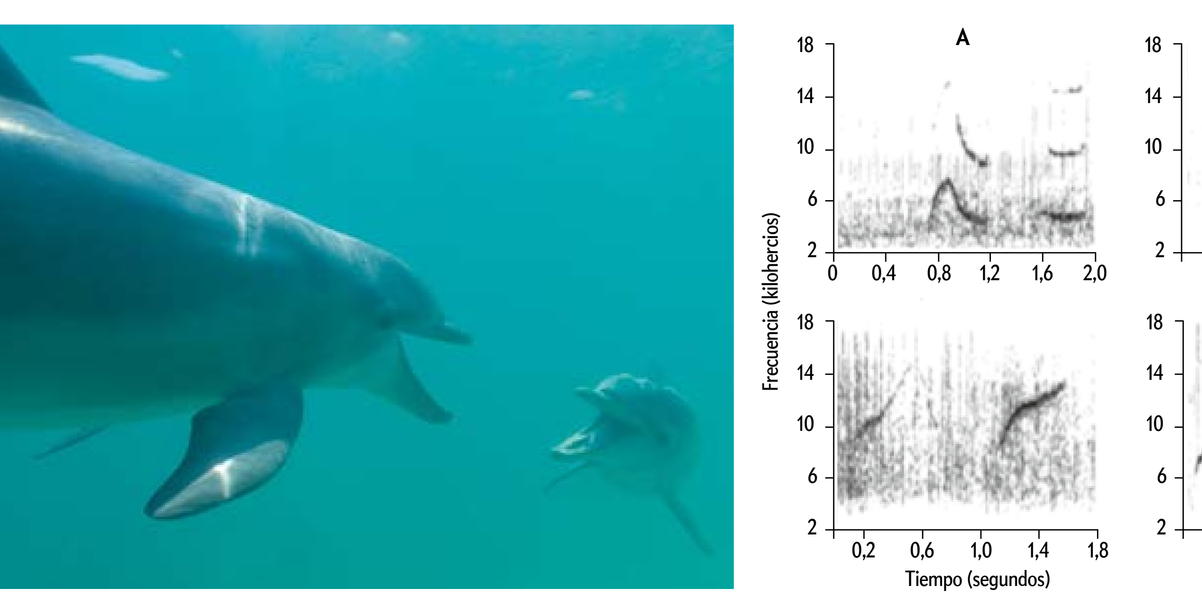
La imitación vocal es importante para mantener la cohesión del grupo y las parejas reproductoras. La imagen superior corresponde a un grupo de murciélagos lanceolados menores (*Phyllostomus discolor*), que habitan en América Central y del Sur. Los murciélagos lanceolados mayores (*Phyllostomus hastatus*), de la misma zona y pertenecientes al mismo género, forman colonias. En este quiróptero, el aprendizaje de un reclamo común por imitación podría servir como contraseña para indicar la pertenencia a la colonia. Las hembras de la especie emiten llamadas propias de la comunidad para ayudar a sus compañeros a encontrar y defender el alimento. En la parte inferior se muestran los espectrogramas de llamadas representativas de dos colonias, que revelan la variación intergrupal.

MILAN KORINEK (*murciélagos*); DE: «GREATER SPEAR-NOSED BATS DISCRIMINATE GROUP MATES BY VOCALIZATIONS», POR J. W. BOUGHMAN Y G. S. WILKINSON EN *ANIMAL BEHAVIOUR* N.º 55, PÁGS. 1717-1732, 1998 (*espectrogramas*), REIMPRESO CON AUTORIZACIÓN DE ELSEVIER

CONTRASEÑA DE GRUPO

La imitación vocal en el marco de la reproducción puede ayudar a los individuos a conseguir una pareja o a mejorar la atención dispensada a las crías y, por tanto, aumentaría el éxito reproductor. Pero la imitación entre los miembros de un grupo social proporciona otras ventajas; las llamadas propias de cada grupo facilitan a menudo la defensa cooperativa de los recursos frente a otros grupos competidores, lo que mejora el acceso a estos.

Actuar como emisor lanzando una señal a los demás miembros, y como receptor respondiendo a esta cuando procede de los compañeros, podría beneficiar a los individuos de diversas maneras. En primer lugar, las llamadas comunes servirían para reconocer a los miembros del grupo, sobre todo en los grandes clanes en los que no todos se conocen bien. Dado que esas señales se aprenden por imitación, lo que a menudo precisa una interacción prolongada con otros miembros, reflejan la experiencia social del emisor y codifican aspectos del bagaje social del individuo. Por consiguiente, tales llamadas suministran información a los receptores sobre los integrantes de una gran red social que no conocen al dedillo, y les ayudan a saber con



Los delfines mulares (*Tursiops* sp.) se comunican por medio de llamadas que suenan como silbidos al oído humano pero que se generan de un modo similar a otras vocalizaciones de los mamíferos. Los machos forman pequeñas manadas o alianzas y cambian sus llamadas para adoptar las de sus compañeros. A la derecha aparecen los espectrogramas de dos delfines que generan silbidos similares, hecho que a menudo indica una alianza social (*columna B*), y de dos delfines que están emitiendo silbidos identitarios, propios de cada uno y distintos entre sí (*columna A*).

rapidez si un individuo ha mantenido contacto con su grupo y si puede pertenecer a él. Janette Boughman y Gerald Wilkinson, del Colegio Park de la Universidad de Maryland, han estudiado un caso en que los reclamos de grupo sirven como contraseña. Las hembras del murciélago lanceolado mayor (*Phyllostomus hastatus*) se congregan en dormideros enormes y sus componentes comparten llamadas comunes cuando salen a buscar alimento por la noche. Los experimentos en que se inducía la formación de nuevas colonias demostraron que, en el plazo de meses, las hembras acababan componiendo nuevos sonidos para comunicarse con los nuevos compañeros. Posteriores estudios de observación y *playback* han revelado que las hembras emplean esas vocalizaciones para atraer a otros miembros de la colonia cuando localizan una rica fuente de alimento, que así defienden de otros murciélagos. En conjunto, estos estudios apuntan a que las llamadas comunes funcionan como contraseñas de pertenencia a un grupo y ayudan a coordinar la búsqueda de alimento en un ambiente ruidoso y ajetreado. Facilitan el reconocimiento de los congéneres y permiten a los murciélagos que guardan la fuente de alimento distinguir a estos de los extraños.

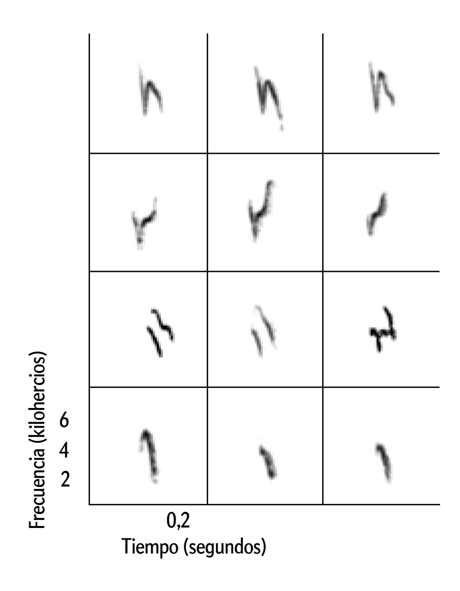
El murciélago lanceolado mayor ejemplifica otra ventaja de la imitación vocal en los grupos sociales: la posibilidad de informar a los extraños sobre la identidad de la comunidad. Es decir, aparte de facilitar la rápida identificación de los compañeros, avisan a los intrusos del tamaño y de la capacidad de respuesta del grupo.

Un artículo de revisión compilado por Peter L. Tyack, de la Universidad de San Andrés, en Escocia, menciona el ejemplo de los delfines mulares (*Tursiops* sp.), que brinda una oportunidad para evaluar el empleo de las llamadas dentro del grupo familiar. Cuando alcanzan la madurez, los delfines macho entablan alianzas con uno o dos individuos del mismo sexo. Estos pequeños grupos pasan hasta el 80 por ciento del tiempo juntos, habitualmente hasta que uno de los miembros muere. Los integrantes de estos grupos de conveniencia acaban compartiendo un silbido, pero también mantienen el suyo propio. A diferencia de otras especies, como los piquituertos y los murciélagos lanceolados, en las que cada individuo produce una sola variante de llamada de contacto, los delfines poseen al menos dos de ellas: una representa la identidad individual y la otra constituye la seña del grupo. Para entender el modo en que los delfines utilizan ambos silbidos, se ha estudiado a los machos de una alianza entablada en cautividad que podían desplazarse entre dos piscinas. Se observó que, cuando los animales quedaban apartados del grupo, emitían solo los silbidos individuales. Los delfines, y probablemente otros animales, emplean señales que reflejan la identidad individual cuando se comunican con miembros conocidos y, según los biólogos, solo recurren a la seña de identidad del grupo ante competidores extraños.

Tanto si comunican a los compañeros la pertenencia a su grupo como si advierten a los extraños del tamaño y las intenciones de los defensores, se ha demostrado que la emisión de llamadas comunes y la respuesta a ellas refuerza la eficacia biológica del grupo, al menos por dos razones: la emisión de la señal «correcta» abre el acceso a los recursos, mientras que la respuesta a las llamadas propias de la comunidad permite proteger mejor los recursos frente a otros competidores que intentan penetrar en su territorio o acaparar los bienes.

EN BUSCA DE LOS COMPAÑEROS ADECUADOS

Además de mejorar la dinámica cooperativa del grupo y la coordinación en el cuidado de las crías, las llamadas comunes a escala poblacional, o dialectos, ayudan a los individuos a reconocer a sus parejas y compañeros. Pese a la rareza de los dialectos, Tyack señala que se han descrito en la orca y en el cachalote (*Physeter macrocephalus*), así como en aves como la amazona nuquiamarilla (*Amazona auropalliata*) y el piquituerto común. Cada una de estas especies cuenta con varios dialectos y los individuos producen llamadas atribuibles a un solo tipo de ellos.



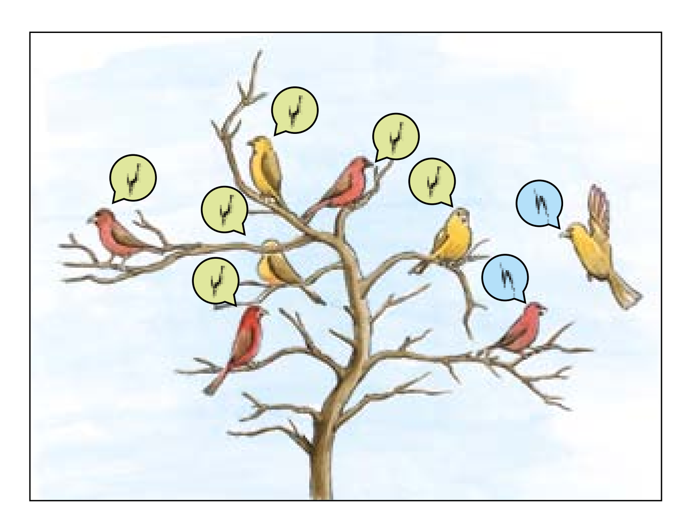


Los piquituertos comunes, en la imagen bañándose en un charco, han adquirido tamaños distintos para especializarse en el consumo de semillas de ciertas especies de coníferas. Esta ave presenta dialectos, una rareza en el reino animal. Las filas del gráfico de la izquierda contienen los espectrogramas de cuatro dialectos, cada uno de ellos característico de una talla determinada; las llamadas de cada fila corresponden a tres pájaros de un mismo tamaño. Aunque la estructura acústica varía ligeramente entre los individuos del mismo dialecto, las diferencias de categoría permiten distinguir los dialectos (lo son para el oído humano y presumiblemente también para los pájaros).

Como sucede con los reclamos propios de un grupo, se ha comprobado que, en las especies con dialectos, los individuos suelen adoptar las llamadas de sus nuevos compañeros cuando se trasladan a una población nueva. Timothy Wright, ahora en la Universidad estatal de Nuevo México en Las Cruces, y sus colaboradores dedujeron mediante estudios genéticos que las amazonas nuquiamarillas que viajaban fuera de los límites de su dialecto aprendían la estructura del canto del lugar de adopción, a la vez que asimilaban las llamadas comunes de la nueva bandada y los dialectos propios de la población. Los autores han propuesto que los inmigrantes de esta y otras especies aprenden el dialecto local para poder acceder a los dormideros y participar en los viajes de aprovisionamiento. En estos conocen la ubicación de las parcelas de alimentación y el modo de acceder a ellas, un aspecto primordial para la supervivencia. En las especies como los psitácidos, que suelen buscar alimento y dormir en grupo y que cooperan en la crianza de los pollos, los receptores que escogen a compañeros de aprovisionamiento y parejas que «hablan» el dialecto local se cercioran así de que sus compinches pueden hallar alimento y escoger un dormidero seguro, recursos de los que estos últimos también saldrán beneficiados.

Aunque los animales como las amazonas nuquiamarillas aprenden nuevos dialectos, un puñado de especies no puede o no quiere hacerlo en la edad adulta. Cuando los animales no emiten ni reconocen las vocalizaciones de otros, su capacidad para coordinar las conductas sociales se ve mermada. La imposibilidad de aprender nuevas llamadas podría limitar la comunicación entre poblaciones y restringir su interrelación social y genética.

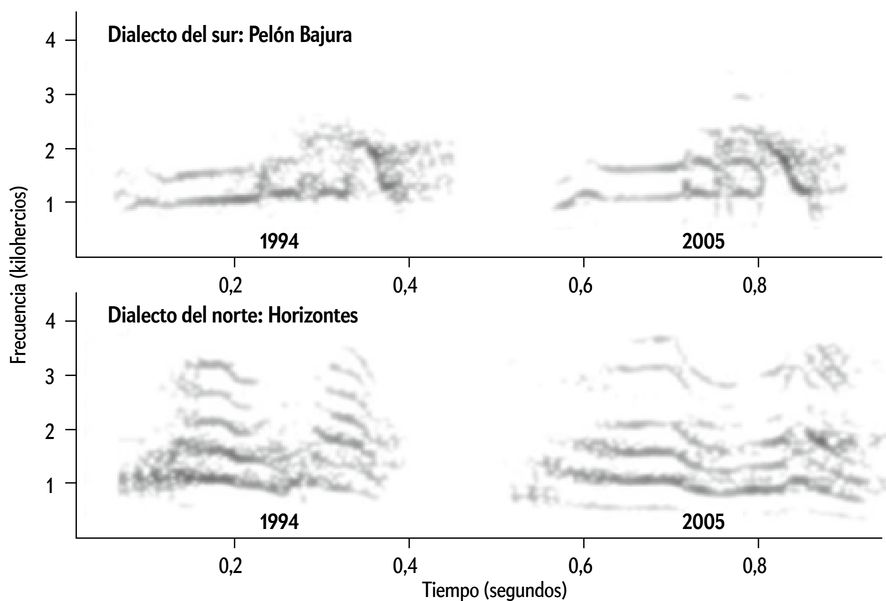
Jeff Groth, del Museo americano de Historia Natural en Nueva York, y Craig Benkman, de la Universidad de Wyoming, descubrieron que los dialectos se asociaban a diferentes clases de tamaño, o «razas», de piquituerto común. Los piquituertos de cada tamaño poseen un pico de unas dimensiones y morfología particulares que les permite alimentarse de un tipo concreto de piña. Los estudios llevados a cabo por Julie W. Smith y sus colaboradores, de la Universidad estatal de Nuevo México, revelaron que los piquituertos sacaban provecho de la convivencia con otros congéneres de hábitos alimentarios afines, porque compartían información sobre la localización de los frutos pre-



El piquituerto común utiliza las llamadas de contacto para localizar a los miembros de su grupo y buscar fuentes de alimento. Los ejemplares pertenecientes a distintos ecomorfos, distinguibles por el tamaño y por especializarse en comer los frutos de uno o varios tipos de coníferas, con frecuencia se alimentan en una misma zona. Los dialectos de los ecomorfos son distintos, de modo que los individuos de un ecomorfo (*globos azules*) pueden distinguirse de los miembros de otro (*globos verdes*) por sus reclamos.

KENDRA SEWALL (*espectrograma*); ARDEA/JIM ZIPP, ANIMALS ANIMALS (*piquituertos*); SIGMA XI (*ilustración*)





Las amazonas nuquiamarillas (*Amazona auropalliata*), al igual que los piquituertos comunes y algunos cetáceos, presentan dialectos. En el caso de las amazonas, se hallan determinados por la región geográfica. Por ejemplo, los individuos de Horizontes y de la Hacienda El Pelón de la Bajura, en Costa Rica, poseen dialectos distintos. Se piensa que cuando uno de estos loros migra de una población a otra aprende el dialecto de su nueva población y los reclamos comunes del nuevo dormidero.

dilectos y ello mejoraba la alimentación de todos los miembros de la bandada.

No obstante, los piquituertos especializados en distintas comidas pueden resultar difíciles de identificar solo por su aspecto, y es posible hallar ejemplares de diferentes tamaños y preferencias nutritivas en el mismo bosque. Los dialectos propios de cada tamaño de pájaro suponen la diferencia más ostensible entre estos grupos y podrían servir para comunicar sus diversas especializaciones alimentarias. Además, el trabajo de la autora, junto con el del laboratorio de Benkman, demuestran que los piquituertos aprenden sus dialectos en las primeras etapas de la vida, antes de comenzar a volar y dispersarse a nuevos lugares, y casi nunca los cambian una vez alcanzada la madurez. De ahí que los dialectos resulten un indicador fiable del tipo de tamaño y de la especialización alimentaria. En conjunto, los dialectos impiden la comunicación y el establecimiento de vínculos sociales entre aves de distintos tamaños, y se cree que facilitan el proceso de especiación en que se halla inmerso el piquituerto común.

Los datos aportados por los estudios en animales dotados de múltiples sistemas sociales hacen pensar que la imitación vocal aumenta la supervivencia y las posibilidades de reproducción del individuo de tres maneras: permite ganarse el beneplácito de la pareja y mejorar la coordinación en los cuidados parentales; asegura y mantiene el acceso a los recursos comunes, y ayuda a la selección de las parejas y compañeros adecuados. Si aceptamos estos hechos, debemos preguntarnos entonces cuáles son los mecanismos que garantizan que la imitación vocal constituye un indicador fiable de la identidad y la cooperación social. ¿Qué impide que los tramposos se aprovechen del sistema y abusen de la imitación sin corresponder a las parejas o a los compañeros del grupo? Descubrir los mecanismos que evitan que un individuo adopte las llamadas de varias parejas o varios grupos de alimentación o poblaciones, para recoger los frutos de la simulación sin ofrecer nada a cambio, requiere examinar el proceso de aprendizaje que subyace a la imitación vocal.

UN CANTO HONESTO

Un motivo para pensar que la imitación de las llamadas refleja la implicación del emisor en un vínculo social o su disposición a cooperar es el coste que conlleva el aprendizaje de nuevas vocalizaciones [*véase* «¿Es sincero el canto de las aves?», por William A. Searcy y Stephen Nowicki; Investigación y Ciencia, agosto de 2008]. Existen pruebas de que el proceso exige tiempo y esfuerzo, circunstancia que indicaría a los compañeros que se está dispuesto a entablar una relación de cooperación seria. Es más, el aprendizaje vocal requeriría circuitos neurales y regiones del cerebro especializados, lo que supondría un consumo de recursos energéticos, sobre todo durante el delicado y costoso período de crecimiento. Por tanto, la propia capacidad de aprender vocalizaciones y de embarcarse en la imitación vocal constituye una clara apuesta del individuo. No obstante, la adquisición de nuevas llamadas comunes tal vez forje el vínculo más fuerte entre la imitación vocal y la afiliación.

Especies tan diversas como los carboneros (*Poecile* spp.) y los tities pigmeos precisan varias semanas para decidirse a compartir una llamada con nuevas parejas o recién llegados a su grupo. En ciertos casos, los vínculos sociales se forman durante el período de imitación vocal, lo cual pone de manifiesto la relación entre la simulación y el establecimiento de conexiones sociales. De este modo, los machos de lúgano (*Carduelis spinus*) que conviven en cautividad modifican sus llamadas de contacto hasta adquirir una común a todos ellos. El proceso

de cambio vocal dura varias semanas y los pájaros que aprenden con mayor rapidez los reclamos de sus compañeros también entablan con mayor frecuencia y en menos tiempo conductas de afiliación con ellos, en comparación con los individuos que tardan más en aprender.

La relación temporal entre el aprendizaje y la afiliación se produciría porque, de hecho, la interacción social mejora, o incluso resulta imprescindible, para el proceso de aprendizaje. En algunas especies la imitación vocal podría ser reforzada por una retroalimentación positiva que la pareja o los compañeros dispensarían al individuo, que propiciarían las interacciones sociales cuando este aprendiera más rápido o mejor. Estudios con periquitos macho demuestran que el proceso de imitación vocal es mejorado u orientado por la retroalimentación positiva. Kazuchika Manabe, de la Universidad Nihon, y Robert J. Dooling, de la Universidad de Maryland, recurrieron a la estrategia experimental de condicionamiento operante (en que los animales son recompensados cuando exhiben cierta conducta) para enseñar a copiar un reclamo a periquitos macho, a cambio de un bocado sabroso. Las hembras de periquito prefieren los machos cuyos reclamos se asemejan a los suyos, así que su retroalimentación positiva tal vez oriente y refuerce la imitación vocal del macho. Tales ejemplos demuestran que el aprendizaje en sí mismo vincula la imitación vocal con el establecimiento de relaciones sociales y avala una conexión directa entre la afiliación y el coste que representa el cambio vocal.

El tiempo, el esfuerzo y, en particular, la maquinaria cognitiva que los animales han de empeñar para adquirir las nuevas llamadas debieran asegurar que la imitación persigue un fin honesto. Estos recursos necesarios podrían explicar la asociación entre la imitación vocal y la afiliación, no solo en distintos niveles de organización social, sino en las diversas especies capaces de aprender vocalizaciones.

LAS VENTAJAS DEL APRENDIZAJE

Según el trabajo de la autora y otros estudios citados, la imitación de reclamos aparece en numerosos animales dotados de habilidades de aprendizaje vocal, y existen indicios de que reporta ventajas en términos de eficacia biológica, ya que mejora el éxito reproductivo y la supervivencia tanto de los emisores como de los receptores. En concreto, la imitación facilitaría la comunicación con la pareja o la coordinación de los cuidados de la descendencia; la obtención y el mantenimiento del acceso a recursos; y el reconocimiento de las parejas y de los compañeros adecuados. Pese a que las ventajas de la simulación varían en los diferentes niveles de organización social, el proceso de aprendizaje que se encuentra tras ella podría explicar su asociación con la afiliación entre los aprendices. Los estudios que analizan los lazos directos entre la imitación vocal y la eficacia biológica se encuentran en marcha. Pero hasta el momento parece que las especies que aprenden a emular las llamadas de otros captan mejor la atención de los compañeros y mantienen el contacto con ellos en entornos sociales complejos, cambiantes y ruidosos. Esta mejora en la comunicación contribuye a su vez a aumentar la eficacia biológica.

PARA SABER MÁS

Whistle matching in wild bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*). V. M. Janik en *Science*, vol. 289, págs. 1355-1357, 2000.

Bird calls: A cornucopia for communication. P. Marler en *Nature's Music: The Science of Birdsong*, dirigido por P. Marler y H. Slabbekoorn. Elsevier Academic Press, San Diego, CA., 2004.

Vocal labelling of family members in spectacled parrotlets, *Forpus conspicillatus*. R. Wanker, Y. Sugama y S. Prinage en *Animal Behaviour*, vol. 70, págs. 111-118, 2005.

Limited adult vocal learning maintains call dialects but permits pair-distinctive calls in red crossbills. K. B. Sewall en *Animal Behaviour*, vol. 77, págs. 1303-1311, 2009.

Early learning of discrete call variants in red crossbills: Implications for reliable signaling. K. B. Sewall en *Behavioral Ecology and Sociobiology*, vol. 65, págs. 157-166, 2011.

TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN

Las fronteras de Internet

Para evitar el colapso de la Red ante el creciente tráfico de datos, hay que modificar por completo el tratamiento de la información, afirma el director de los Laboratorios Bell de Investigación

Larry Greenemeier

Al finalizar este año, el número de teléfonos inteligentes, tabletas y otros artilugios conectados en red sobrepasará al de seres humanos. Pero lo más notable es que los dispositivos que llegan al mercado, cada vez más rápidos y eficaces, producen y consumen información a niveles jamás alcanzados. Como informa Cisco, una de las principales compañías de Internet, en 2012 el tráfico de datos en redes móviles creció un 70 por ciento. Sin embargo, la infraestructura mundial de conexiones es finita, por lo que muchos se preguntan cuándo se llegará al límite y qué habrá que hacer en ese momento.

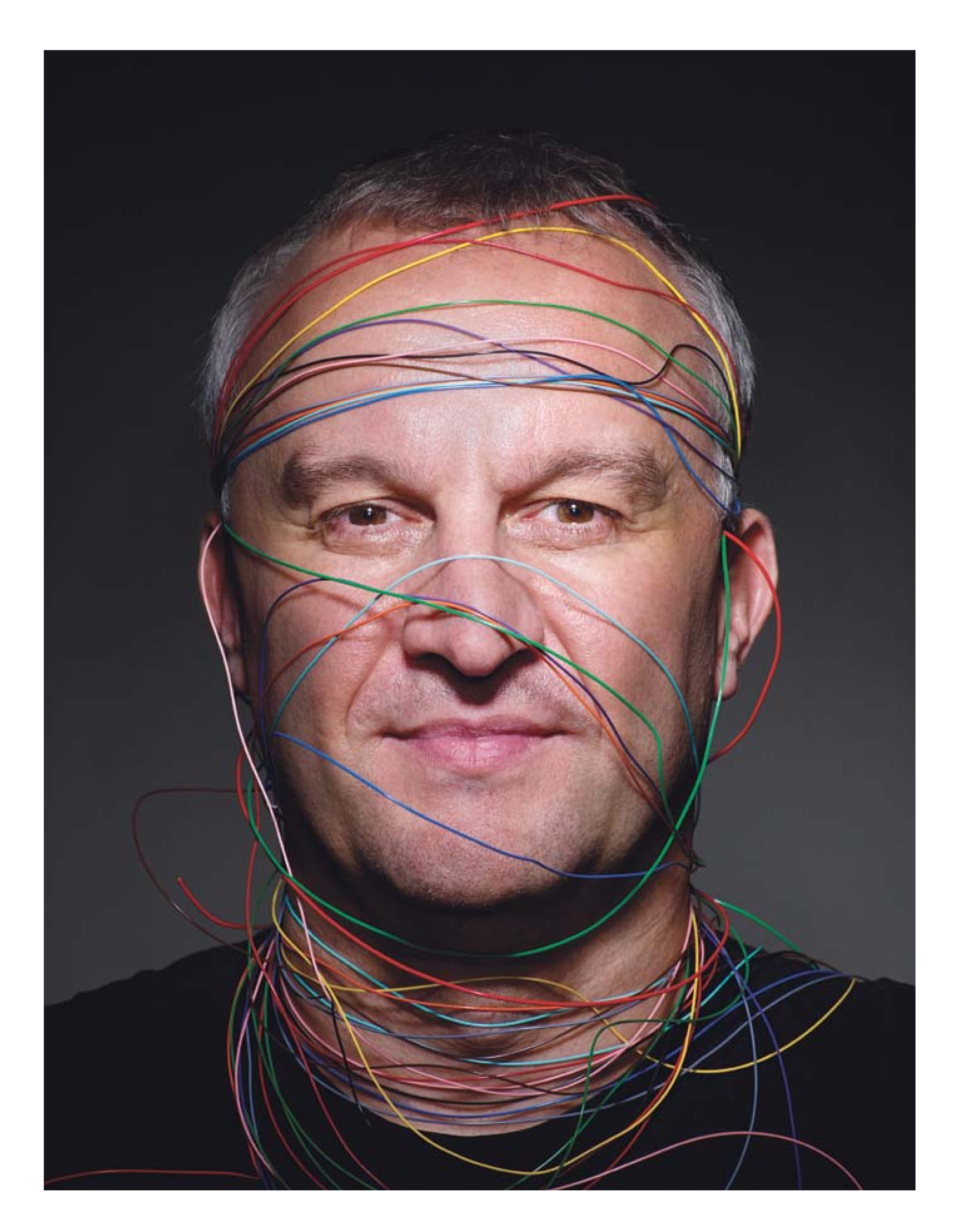
EN SÍNTESIS

Markus Hofmann, ingeniero y científico informático, dirige los Laboratorios Bell de Investigación, en Holmdel (Nueva Jersey).

Su trabajo se centra en investigar si unas redes de comunicaciones más inteligentes podrían auxiliar a Internet en situaciones complejas.

Según el experto, Internet y la infraestructura que la sostiene deben admitir el tráfico de datos más intenso que generan los dispositivos móviles y los contenidos multimedia.

DAVID YELLEN



Por supuesto, puede aumentarse la capacidad mediante la instalación de nuevos cables que contengan más fibras ópticas transmisoras o la descarga de parte del tráfico en redes satelitales de menor tamaño, pero estas tácticas no hacen más que retrasar lo inevitable. La solución consiste en dotar de mayor inteligencia a la infraestructura global, y para ello se necesitan dos condiciones principales. Por un lado, disponer de computadores y dispositivos con capacidad de preprocesar sus contenidos, y tal vez de filtrarlos o agregarlos, antes de verterlos en la red; por otro, se ha de contar con una red que comprenda mejor la finalidad de esa información, en vez de percibirla como una interminable sarta de bits y octetos.

Para conocer el modo de lograr tales avances, hemos conversado con Markus Hofmann, director de los Laboratorios Bell de Investigación (Holmdel, Nueva Jersey), rama de I+D en Alcatel Lucent acreditada por el desarrollo del transistor, el láser, los dispositivos de carga acoplada y un sinfín de innovaciones técnicas del siglo xx. Hofmann, que en 1998 ingresó en los laboratorios tras doctorarse en la Universidad de Karlsruhe, y su equipo consideran que la manera de progresar consistirá en estructurar en red la información, una estrategia que promete ampliar la capacidad de Internet a través de una mayor inteligencia. A continuación, se ofrecen extractos de la entrevista.

¿Cómo se sabe que nos estamos aproximando a los límites de nuestra estructura de telecomunicaciones actual?

Hay indicios sutiles, aunque innegables. Como ejemplo personal, cuando envío por Skype a mis padres en Alemania vídeos de mis hijos jugando al hockey, a veces la imagen se congela en los momentos más interesantes. Aunque ello no sucede muy a menudo, tiende a ser cada vez más frecuente. Es una señal de que las redes sufren sobrecarga por el volumen de datos que se les exige transmitir.

Sabemos que la naturaleza impone límites a la cantidad de información que puede transmitirse por determinados canales de comunicación. El ingeniero y matemático Claude E. Shannon ya determinó ese límite durante sus trabajos en los Laboratorios Telefónicos Bell, el cual nos informa hasta dónde podemos avanzar con las técnicas actuales. Nos estamos acercando mucho a esa frontera, nos hallamos ya casi en la mitad del camino. Es decir, cuando el tráfico en la red llegue al doble del actual (lo que podría suceder en cuatro o cinco años), habremos sobrepasado el valor calculado por Shannon. Nos encontraremos ante un muro infranqueable que de ningún modo podrá traspasarse, como tampoco puede aumentarse la velocidad de la luz. Tendremos que adaptarnos a esos límites y, aun así, intentar mantener el crecimiento requerido.

¿Cómo impedir que Internet alcance ese límite?

La manera más obvia consistiría en aumentar la anchura de banda mediante la adición de nuevas fibras. Por ejemplo, en vez de un solo cable de fibra óptica transatlántico, tender dos, cinco o diez. Se trata de un procedimiento radical y sumamente costoso; entre otras tareas, habría que excavar la tierra, tender el cable, instalar múltiples amplificadores, transmisores y receptores ópticos. Para que resultara económicamente viable, no solo sería preciso integrar múltiples canales en una sola fibra óptica, sino que se deberían colapsar los numerosos transmisores y receptores que utilizan técnicas nuevas, como la integración fotónica. Esta estrategia se denomina multiplexión por división espacial.

No obstante, reforzar la infraestructura actual no llegará a satisfacer la creciente demanda de las comunicaciones. Necesitamos una infraestructura que ya no contemple los datos brutos como una ristra de bits y octetos, sino como informaciones que interesan a un usuario de teléfono inteligente u ordenador. Puede que en cierta ocasión se desee conocer la temperatura del aire, la velocidad del viento y la presión atmosférica, o simplemente decidir la ropa que hay que vestir. Ello se conoce como red de información.

¿En qué se diferencia esta «red de información» de la Internet actual?

Muchos llaman red «tonta» a Internet, aunque a mí no me gusta este calificativo. Internet se creó para compartir documentos y datos en tiempo diferido. La resiliencia constituía el requisito más importante del sistema, que debía seguir operando aunque fallasen uno o más nodos [computadores, servidores u otros elementos]. Y el diseño de la red consideraba los datos como simple tráfico digital, sin pretender conocer su significado.

«Necesitamos una infraestructura que ya no contemple los datos brutos como una ristra de bits y octetos, sino como informaciones que interesan a un usuario de teléfono inteligente u ordenador»

Hoy utilizamos Internet en aplicaciones que necesitan funcionar en tiempo real, ya sea para visionar vídeos o para hablar por teléfono. Además, estamos generando un volumen de datos muy considerable. La red tiene que conocer mejor la información que transporta con miras a establecer prioridades en su entrega y operar con mayor eficiencia. De este modo, si sostengo una videoconferencia en mi despacho y giro la cabeza para hablar con alguien que acaba de entrar, el sistema debería interrumpir la transmisión de vídeo hasta que yo volviese a encararme con la pantalla. No debería desperdiciarse la banda de vídeo mientras se habla con personas ajenas a la conferencia.

¿Cómo conseguir que una red preste atención a la información que transporta?

Existen varios procedimientos. Si se desea conocer mejor los datos que circulan por una red (como cuando se envía una peti-

ción de página web desde un usuario al servidor más cercano) pueden utilizarse programas que examinan el paquete de datos, una estrategia conocida como inspección profunda. Comparemos la situación con una carta física enviada por correo postal dentro de un sobre con las señas del destinatario; al servicio postal no le interesa el contenido de la carta, sino su destino. Así se comporta la Internet actual con respecto a los datos. En la inspección profunda del paquete, el programa ordena a la red abrir la envoltura de los datos y leer al menos una parte del contenido. Sin embargo, la información obtenida por este método resulta limitada y exige una enorme capacidad de procesamiento. Por otra parte, no podrá extraerse si los datos que contiene el paquete están encriptados.

Una opción preferible consistiría en etiquetar los datos e instruir a la red para que tratase por separado diferentes tipos de datos. Podría haber una norma que diese preferencia al tráfico de vídeo sobre el de correos electrónicos, sin que se obligara a revelar el contenido exacto ni de unos ni de otros. La red no haría más que tener en cuenta tales etiquetas de datos en las decisiones de enrutado.

¿No podrían servir para ese fin las etiquetas ya asignadas a los datos que circulan por Internet?
Todo depende del nivel al que se utilicen esas etiquetas. Los paquetes de datos que adoptan el protocolo de Internet van precedidos de un encabezamiento que incluye la dirección de origen y la de destino. Podrían considerarse «etiquetas», pero aportan una información muy limitada. No indican el sitio de la Red que solicita el usuario, ni tampoco si los datos pertenecen a una secuencia de vídeo en tiempo real o si admiten el procesamiento por lotes. En realidad, me estaba refiriendo a etiquetas o metadatos de mayor nivel, que pudieran cartografiarse fraccionadamente en esas etiquetas de menor nivel.

Establecer prioridades en el tráfico según la información transportada, ¿no provocaría que la red privilegiara ciertos tipos de tráfico a expensas de los demás?
No debería resultar muy distinto de lo que hoy sucede en nuestras calles y carreteras. Cuando oímos las sirenas de un vehículo de emergencia, nos apartamos para dejarle pasar con la mayor diligencia posible, quizá para salvar una vida humana. La etiqueta en la red desempeñaría la función de sirena: en cuanto reconocemos que se trata de un caso de urgencia, ya no necesitamos saber quién va en el vehículo ni cuál es el problema, y actuamos en consecuencia. ¿Deberíamos también dar prioridad en Internet a ciertos paquetes en situaciones de emergencia? Todo dependerá de la transparencia y los acuerdos establecidos, tanto en el tráfico viario como en la Red.

Aun cuando una Red más compleja pudiera manejar los datos con mayor inteligencia, los contenidos seguirán creciendo de forma exponencial. ¿Cómo podría reducirse el volumen de tráfico que necesita cursar una red?
Nuestros teléfonos inteligentes, ordenadores y demás dispositivos generan una enorme cantidad de datos brutos que luego deben enviarse a centros donde se procesan y almacenan. La transmisión de todos esos datos para su procesamiento centralizado a escala mundial no admitirá expansión en el futuro. Podríamos, en cambio, adoptar un modelo en el que las decisiones relativas a los datos se tomaran antes de que estos llegaran a la red. De este modo, una cámara de seguridad en un aeropuerto, controlada junto con muchas otras por un computador servidor, estaría programada para realizar un reconocimiento facial en un lugar, a partir de los datos que almacena la cámara o servidor, antes de trasladar a la red información alguna.

¿Qué tratamiento recibiría la privacidad en una red de información?
En la actualidad, la privacidad tiene un carácter binario: o bien se mantiene íntegramente, o bien se cede casi por completo para obtener ciertos servicios personalizados, como recomendaciones musicales o recepción de cupones. Es preciso hallar un estado intermedio que permita a los usuarios controlar su información.

El mayor obstáculo es hacer que resulte fácil para el usuario. Fijémonos en la complicada gestión de la privacidad en las redes sociales. Al final, acabamos por ver nuestras fotos entre las de una multitud de rostros que ni siquiera conocemos. Tendría que haber un dispositivo digital equivalente a un mando que regulara el compromiso entre privacidad y personalización: cuantos más datos descubra uno sobre sí mismo, más personalizados resultarán los servicios que reciba. Pero también cabe actuar a la inversa: si no se quiere dar tantos detalles, todavía podrán recibirse algunas ofertas personalizadas, aunque con menos precisión.

Los ataques cibernéticos intentan aprovecharse del fácil acceso a Internet, que en gran medida relega las cuestiones de seguridad a los computadores y otros dispositivos conectados a la Red. ¿Cómo afectaría una red de información a la seguridad de Internet?
El concepto de red de información hace que la infraestructura global conozca mejor el tráfico que cursa la red, lo cual podría servir para identificar y contrarrestar ciertos tipos de ataques. Aunque ello está expuesto a otras complicaciones. Convendría que el tráfico de datos estuviera cada vez más encriptado para favorecer la seguridad y la privacidad. Desde luego, una vez cifrados los datos, resultará difícil extraer la información que contienen. Se trata de un reto científico que exigirá nuevos sistemas de encriptación que mantengan el secreto, a la par que permitan ciertas operaciones matemáticas sobre la información encriptada.

Imaginemos que las rentas de cada familia de un distrito están encriptadas y almacenadas en un servidor de la «nube», de manera que nadie (salvo el propietario autorizado) puede acceder a los números reales. Un cifrado eficaz de los datos debería permitir a los programas que se ejecutan en la nube calcular la renta media del distrito, sin identificar ninguna de las familias implicadas, simplemente operando sobre los números encriptados.

Otra solución consistiría en idear métodos ingeniosos para gestionar las claves de encriptación, de forma que pudieran compartirse sin amenazar la seguridad. Si se realizan bien, ninguno de estos sistemas debería suponer una carga adicional para el usuario. Ahí está el quid de la cuestión. Recordemos cuántos usuarios encriptan hoy sus correos electrónicos. Casi ninguno, porque ello les supone un esfuerzo adicional.

PARA SABER MÁS

The age of the application-aware network. M. Hofmann. **tinyurl.com/cj25voa**

ASTRONOMÍA

CUATRO NOCHES

En el desierto más seco de la Tierra, una astrónoma escudriña el cielo en busca de pistas sobre la evolución de la Vía Láctea. Lo que sigue a continuación es el relato de uno de sus viajes, efectuado en marzo de 2011

Anna Frebel

ESTRELLADAS

Vigilantes nocturnos: Baade y Clay, los dos telescopios Magallanes gemelos, miden 6,5 metros de diámetro. Se encuentran en la cima del cerro Manqui, en la zona chilena del desierto de Atacama.

Anna Frebel es profesora de física en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. En 2010 fue galardonada con el premio Annie J. Cannon de la Sociedad Americana de Astronomía.



Llegada

Una vez acomodados en la camioneta roja, el conductor deja atrás el aeropuerto y me lleva a través del desierto de Atacama hasta el cerro Manqui, un pico aislado. Dos horas más tarde, cuando el vehículo sortea una curva de la tortuosa carretera que lleva a la cumbre, doy la bienvenida a una imagen familiar: la luz del sol reflejándose sobre las cubiertas plateadas de Baade y Clay, los telescopios gemelos Magallanes. Mi corazón se acelera. A partir de mañana por la noche, el telescopio Clay será todo mío.

Unas tres veces al año viajo desde Boston hasta el Observatorio de Las Campanas, en Chile, para intentar esclarecer algunos de los misterios que aún quedan por resolver sobre la evolución de nuestra galaxia. Aunque los astrónomos estamos muy familiarizados con la anatomía de la Vía Láctea, ignoramos todavía numerosos detalles acerca de su nacimiento y desarrollo. Las simulaciones por ordenador sugieren que, en el universo temprano, miles de pequeñas galaxias rodeaban la Vía Láctea. Esta habría crecido a costa de sus hermanas menores, devorando a muchas de ellas. Mi trabajo se centra en validar dicha hipótesis. Para ello, comparo la composición química de las estrellas viejas del halo galáctico (el «extrarradio» de la Vía Láctea) con la de las estrellas antiguas de las galaxias enanas que, aún hoy, orbitan cerca de la Vía Láctea. Si las simulaciones son correctas, todos estos astros deberían mostrar una composición muy similar.

Eso es lo que han venido mostrando los estudios realizados durante los últimos años. Con toda probabilidad, la Vía Láctea ha crecido engullendo galaxias enanas cercanas e incorporando sus estrellas al halo. Incluso en la época actual, nuestra galaxia parece seguir aumentando su tamaño gracias a las corrientes estelares arrebatadas a las galaxias enanas vecinas. Los astrónomos, sin embargo, aún no hemos recopilado datos suficientes para plasmar tales ideas en los libros de texto. Por ello, de vez en cuando debemos abandonar nuestros despachos universitarios y viajar a algún lugar remoto —preferiblemente, situado a gran altitud— para enfrentarnos al cielo nocturno en su descarnada belleza. Esos viajes me recuerdan por qué me enamoré de la ciencia. Es eso lo que me gustaría mostrarles.

Preparativos

Como de costumbre, he llegado al observatorio con un día de antelación para adaptarme al horario nocturno. En esta época del año, una jornada típica comienza a las tres de la tarde y finaliza a las seis de la mañana. Las observaciones se inician hacia las seis de la tarde. Descanso una hora antes de cenar con otros astrónomos en el refugio, donde la obsesión por la investigación es palpable. Comentamos estudios recientes que hemos encontrado interesantes, diversos problemas técnicos con los telescopios y, cómo no, hablamos de las previsiones meteorológicas. Todos sentimos pavor por los cielos nublados.

Después de cenar, visito a los operarios y al personal técnico encargado de mantener a punto el telescopio óptico Clay y su impresionante espejo de 6,5 metros de diámetro. Solo un telescopio relativamente grande, como este, puede recolectar la tenue luz procedente de las lejanas estrellas que pretendemos estudiar. Aunque esta noche no realizaré ninguna observación, me detengo a charlar con el personal y con el astrónomo actual, a fin de conocer lo que ha ocurrido en Las Campanas desde mi última visita.

Sobre las dos de la madrugada, después de haber permanecido despierta el tiempo suficiente como para comenzar a cambiar mi ciclo de sueño, abandono el telescopio y me adentro en la noche y el frío, mientras busco mi camino entre arbustos y piedras. Atacama es el desierto más seco del mundo. Ello lo convierte en un lugar ideal para estudiar las estrellas, ya que la escasa humedad del aire evita la distorsión de los rayos de luz. Incluso sin telescopio, el hemisferio austral ofrece una visión incomparable de la Vía Láctea. Inclino la cabeza hacia atrás y miro hacia el centro de nuestra galaxia, donde las incontables estrellas parecen polvo de diamante inmerso en melaza.

Si observásemos la Vía Láctea de canto, su aspecto nos recordaría al de un huevo frito, con una brillante y densa yema de estrellas (el centro galáctico) alrededor de la cual se extiende un disco formado por los brazos espirales de la galaxia. A su vez, estos se encuentran rodeados por un halo difuso de estrellas viejas.

EN SÍNTESIS

Aunque los astrónomos conocen muy bien la estructura actual de nuestra galaxia, sus orígenes y desarrollo continúan planteando todo tipo de preguntas.

La autora viaja con regularidad al desierto de Atacama, desde donde investiga las galaxias satélite de la Vía Láctea y las estrellas del halo galáctico.

A partir del espectro de una estrella puede inferirse su edad. Las estrellas del halo de la Vía Láctea y las de sus galaxias enanas parecen ser coetáneas.

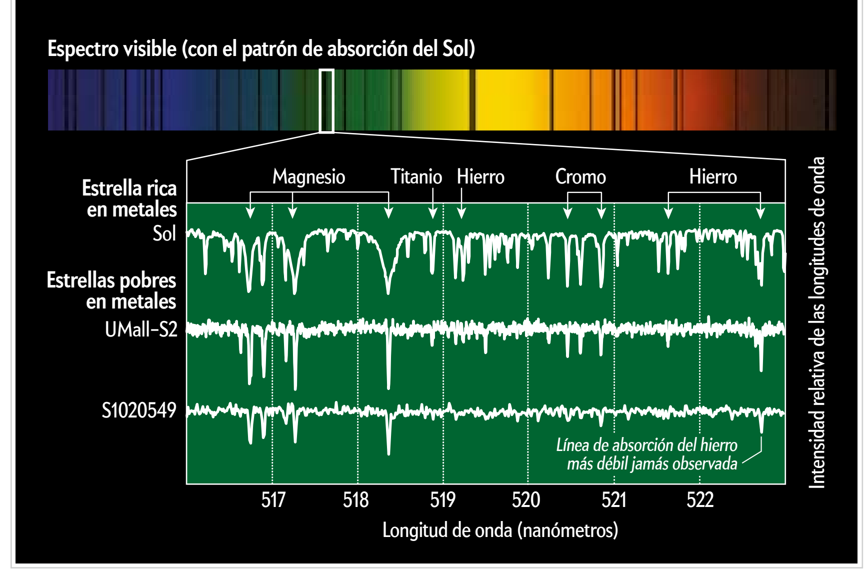
Esos datos sugieren que la Vía Láctea habría crecido engullendo las pequeñas galaxias satélite de sus inmediaciones, un proceso que parece continuar hoy en día.

PÁGINAS ANTERIORES: ALEX TUDORICA

OBSERVACIONES

El código de barras de una estrella

La luz procedente de una estrella contiene gran cantidad de información. En un telescopio, el espectrógrafo descompone la luz del astro en distintos colores, cada uno correspondiente a una longitud de onda. Las líneas oscuras que aparecen a lo largo del espectro reciben el nombre de líneas de absorción, ya que indican la cantidad de luz absorbida por los diferentes elementos químicos presentes en las capas exteriores de la estrella. Cuanto más fina es una línea, menos abundante resulta el elemento en cuestión. La figura inferior reproduce las líneas de absorción del hierro y otros elementos pesados en el Sol y en dos estrellas pertenecientes a galaxias enanas de la Vía Láctea. Estas últimas contienen muchos menos elementos pesados que el Sol. Dicha característica revela una edad muy avanzada, ya que los elementos pesados escaseaban en el universo primitivo.



FUENTE: ANNA FREBEL

Hasta la fecha se han descubierto unas treinta galaxias enanas que orbitan en las regiones más externas del halo. De media, cada una contiene unos mil millones de estrellas; una cantidad muy inferior a los entre 200.000 y 400.000 millones de astros que pueblan la Vía Láctea. Algunas galaxias enanas solo parecen poseer unos pocos miles de estrellas, si bien en cúmulos tan tenues resulta difícil efectuar un recuento fiable.

Mi investigación se centra en las estrellas de las galaxias enanas ultratenues. Descubiertas hace apenas unos diez años, sus estrellas parecen encontrarse entre las más viejas jamás observadas. Su avanzada edad puede deducirse a partir de la proporción de los elementos químicos que contienen. Las primeras estrellas del universo se formaron a partir de nubes compuestas exclusivamente por hidrógeno, helio y pequeñas trazas de litio; los elementos químicos más ligeros y los únicos que existían en aquella época. Con el tiempo, las reacciones nucleares en el interior de aquellos astros primigenios comenzaron a forjar elementos más pesados, como carbono, oxígeno, nitrógeno y hierro. Después, estos se esparcieron por el espacio cuando algunas de esas estrellas explotaron como supernovas. Ello dio lugar a una segunda generación de estrellas, las cuales nacieron a partir de nubes de gas enriquecidas con elementos pesados. En la jerga de los astrónomos, el litio y todos los elementos más pesados reciben el nombre de «metales». Solo las estrellas pertenecientes a la segunda generación y las posteriores contienen cantidades sustanciales de metales. Mi trabajo consiste en estudiar las estrellas de bajo contenido metálico, pues ello indica que se formaron en la infancia del universo. Las galaxias enanas ultratenues poseen menos estrellas que sus hermanas más luminosas; sin embargo, contienen una mayor proporción de astros pobres en metales. Con toda probabilidad, constituyen vestigios de un tiempo muy remoto.

Desde el telescopio me dirijo al refugio bajo la sola luz de las estrellas. No hace falta linterna.

Relato de una noche de trabajo

Después de dormir durante la mayor parte del segundo día, me preparo para mi primera noche de observación. Tomo asiento en el lugar de trabajo. Las pantallas de ordenador me informan del estado del telescopio, del tiempo meteorológico y de la posición de las estrellas. El operador encargado de maniobrar el instrumento según mis indicaciones se sienta frente a quince monitores dispuestos en varias filas.

Una semana antes de llegar a Chile elaboré una lista de objetivos: estrellas de galaxias enanas que deseaba observar, ordenadas según su prioridad. Tras revisar las condiciones meteorológicas, elijo la primera de la lista y pido al operador que oriente el telescopio en la dirección adecuada.

Para llegar hasta nuestro planeta, la luz procedente de las galaxias enanas debe recorrer unos 130.000 años luz. A pesar de la exigua cantidad de luz estelar que sobrevive a ese viaje, esta contiene el «ADN químico» del astro emisor. Ese código, no obstante, debe ser descifrado. Para ello el telescopio Clay cuenta con un espectrógrafo de alta resolución, el cual descompone la luz de la estrella en un espectro de colores, cada uno correspondiente a una longitud de onda. El espectro aparece en una pequeña pantalla de ordenador. Al recorrerlo de un extremo a otro, se observan en distintos puntos unas barras negras verticales. Conocidas como líneas de absorción, delatan la abundancia de los diferentes elementos químicos presentes en las capas más externas de la estrella. Una línea de absorción se muestra tanto más fina cuanto menor es la cantidad del elemento correspondiente. La resolución de las técnicas espectroscópicas modernas es tan elevada que nos permite deducir cuántos átomos de cada elemento contiene una estrella.

Todos los análisis que he venido realizando durante los últimos años revelan que, tanto en las estrellas del halo como en las de las tenues galaxias enanas, las líneas de absorción de elementos pesados, como el hierro, resultan muy débiles. Hace un tiempo descubrí en el halo de la Vía Láctea la estrella más pobre en hierro jamás observada: solo poseía el uno por ciento de la cantidad que de dicho metal posee el núcleo terrestre. A modo de comparación, téngase en cuenta que la masa de la estrella ascendía a un 60 por ciento de la del Sol, el cual es unas 300.000 veces más masivo que nuestro planeta.

CRONOLOGÍA

Evolución de la Vía Láctea

Los estudios sobre nuestra galaxia apuntan a un pasado caníbal. **1** En tiempos remotos, la Vía Láctea no habría sido más que una entre múltiples galaxias menores. **2** Después habría comenzado a engullir a sus vecinas, hasta adquirir su tamaño actual. **3** En apoyo a esta hipótesis, los astrónomos han descubierto que las estrellas de las galaxias enanas que aún hoy orbitan en torno a la Vía Láctea (*abajo*) cuentan con una composición química muy similar a las estrellas del halo, el «extrarradio» galáctico. Ello indicaría que, en el pasado, las estrellas del halo habrían pertenecido a las galaxias enanas absorbidas por la Vía Láctea. Aún en la actualidad, nuestra galaxia parece continuar devorando otras galaxias enanas.

1
2
Halo
Vía Láctea en la actualidad
3

Galaxias enanas (*azul*)
Vía Láctea
Galaxia enana elíptica de Sagitario (a unos 70.000 años luz de distancia del Sol)

Esquema de la Vía Láctea en la actualidad, sus galaxias enanas y el halo galáctico

EN «DARK, BUT LIGHT: SMALLEST GALAXIES EVER SEEN SOLVE A BIG PROBLEM», KECKOBSERVATORY.ORG; 12 DE SEPTIEMBRE DE 2007 (*configuración actual de galaxias enanas*); RON MILLER (*ilustración*)

Las estrellas del halo galáctico con un contenido tan bajo en hierro no pudieron haber nacido en épocas recientes en la Vía Láctea. Debieron haberse formado a partir del mismo tipo de nubes de gas que dio lugar a las estrellas viejas que pueblan las galaxias enanas; nubes que solo existieron en la infancia del universo, antes de que las forjas estelares creasen grandes cantidades de elementos pesados. El hecho de que las estrellas viejas del halo y las de las galaxias enanas posean una composición química tan similar parece indicar que, en el pasado, las primeras también formaron parte de una galaxia enana. Con el paso del tiempo, la Vía Láctea habría crecido devorando las galaxias enanas cercanas.

Las pruebas de ese canibalismo galáctico no se reducen a los análisis químicos. También se ha observado lo que parecen ser los restos de anteriores festines: regueros de estrellas en el halo galáctico, los cuales probablemente procedan de galaxias satélite atrapadas en el campo gravitacional de la Vía Láctea. Hoy en día, la Vía Láctea está engullendo poco a poco la galaxia enana elíptica Sagitario, la cual orbita con rapidez en torno a nuestra galaxia. En cada órbita, las estrellas se van apartando de Sagitario y se precipitan hacia el halo de la Vía Láctea.

Alrededor de las siete de la mañana, más de doce horas después de haber entrado en la sala de observación del telescopio, puedo darme por satisfecha con los datos obtenidos sobre las primeras estrellas de mi lista. Ha llegado la hora de concluir la sesión. Reúno mis notas, abandono el telescopio y recorro el corto camino montaña abajo hasta el refugio. No veo la hora de cerrar las tupidas persianas y reposar la cabeza en la almohada. El alba hace desaparecer poco a poco las estrellas del cielo. Pero sé que continúan allí, brillando tal y como lo han venido haciendo desde hace miles de millones de años.

Cuestión de compromiso

Me levanto a las tres de la tarde. Después de comer algo, me preparo para realizar más observaciones. No puedo permitirme desperdiciar un solo minuto, sobre todo teniendo en cuenta que cada sesión en el telescopio cuesta unos 50.000 dólares, por lo que suelo planificar mis noches con gran cuidado.

Analizar con detalle la composición química de una estrella requiere captar una cantidad suficiente de fotones. Por tanto, cuanto más tenue brilla un astro, más tiempo de observación se necesita para recolectar la cantidad de luz adecuada. En cuanto a las estrellas de mi lista que pertenecen a galaxias enanas, lo ideal sería observar cada una de ellas durante unas diez horas. Para las del halo, en cambio, bastan unas tres horas de exposición. Sin embargo, debido a la rotación de la Tierra, resulta imposible observar cualquiera de ellas durante más de cuatro o cinco horas cada noche. La manera de sortear este inconveniente consiste en estudiar el mismo conjunto de estrellas durante varias noches.

Pero existe otra complicación: los rayos cósmicos. Procedentes del espacio exterior, estas partículas de alta energía bombardean constantemente nuestro planeta, por lo que al impactar contra el detector del telescopio degradan los datos. He comprobado que una forma de obtener un balance adecuado entre ambos requisitos (recolectar una cantidad suficiente de luz, pero sin exponer demasiado el instrumento a los rayos cósmicos) consiste en dividir las observaciones en intervalos de 55 minutos. Con un tiempo menor, el numero de fotones no basta para realizar los análisis químicos; con una exposición más prolongada, los instrumentos reciben demasiados rayos cósmicos. Por lo general, observo una estrella durante cuatro o cinco intervalos de 55 minutos y, después, apunto a otra zona del cielo.

Al cambiar de una estrella a otra he de revisar con cuidado todos los datos de los que dispongo: cuántos fotones he acumulado hasta ese instante, la posición de las otras estrellas de interés, así como la previsión meteorológica. El operador del telescopio aguarda mi decisión. Si, por ejemplo, no he recolectado una cantidad suficiente de fotones provenientes de una estrella que desaparecerá pronto en el horizonte, debo decidir si prolongo su observación durante un rato más o si, por el contrario, apunto a otra estrella y continúo el estudio de la primera al día siguiente... confiando en que el cielo estará despejado. En ocasiones resulta posible hacer una pausa y bajar a la cocina a por un refrigerio, pero la mayor parte de las veces he de permanecer junto a los monitores hasta que sé que dispongo de datos suficientes como para dar por concluida la jornada.

Nubes en el horizonte

Hacia las seis y media de la tarde, antes de iniciar una nueva noche de observación, me encuentro paseando por la pasarela situada en el exterior del telescopio Clay. En Las Campanas, contemplar el ocaso constituye una especie de ritual: el sol se esconde lentamente tras el horizonte y tiñe las cumbres montañosas de rosa y melocotón. Cada atardecer marca el inicio de una nueva noche de observación, si el tiempo lo permite. Aunque mi tercera noche comienza bien, poco después el informe meteorológico sobre el monitor me obliga a fruncir el ceño. Abro la puerta del telescopio y asomo la cabeza. Unas nubes tan espesas que parecen nata montada cubren la cima del cerro Manqui. Es imposible hacer nada; esta noche ya no observaré más. Abro mi portátil y comienzo a responder correos electrónicos ignorados desde hace tiempo. Examino los datos obtenidos en estudios previos y comienzo a escribir. La mayor parte de este artículo la escribí aquella noche.

Cuando decido tomarme un descanso, bullen en mi cabeza imágenes de galaxias enanas aún por descubrir. Las simulaciones por ordenador del nacimiento de la Vía Láctea sugieren que aún deberíamos hallar muchas galaxias enanas más. Hasta ahora solo habríamos cartografiado las más brillantes; el resto, o bien serían mucho más tenues, o bien se encontrarían demasiado lejos. En cualquier caso, necesitaremos instrumentos especialmente bien afinados para descubrirlas.

La Institución Carnegie para la Ciencia planea la construcción de un nuevo telescopio en Las Campanas, en una colina vecina al cerro Manqui. Su espejo medirá unos 25 metros de diámetro, casi cuatro veces más que el diámetro del instrumento actual. El nuevo telescopio nos permitirá observar las regiones más remotas del halo de la Vía Láctea, donde esperamos descubrir más estrellas muy pobres en metales. Cuantas más observaciones efectuemos, más cerca estaremos de reconstruir la historia de nuestra galaxia y de averiguar cómo ha llegado a ser lo que es hoy.

PARA SABER MÁS

Linking dwarf galaxies to halo building blocks with the most metal-poor star in Sculptor. Anna Frebel, Evan N. Kirby y Joshua D. Simon en *Nature*, vol. 464, págs. 72-75, 4 de marzo de 2010.

Galaxias enanas y materia oscura. Pavel Kroupa y Marcel Pawlowski en *Investigación y Ciencia*, n.º 414, marzo de 2011.

Precious fossils of the infant universe. Anna Frebel y Volker Bromm en *Physics Today*, vol. 65, n.º 4, pág. 49, abril de 2012.

por Marc Boada Ferrer

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



Creación de una xiloteca

De entre todos los materiales, las maderas destacan por su amplísimo campo de utilización y el reducido coste energético de su obtención

Pocas semanas atrás se celebró en San Celoni, pequeño municipio barcelonés, un encuentro titulado *Divulgación, ciencia y mundo forestal* en el que participaron un nutrido grupo de científicos, propietarios forestales, gestores ambientales y cargos públicos. Allí se debatieron varios aspectos relacionados con el bosque: desde su uso o función social hasta su gestión como fuente de energía para un futuro no muy lejano. En cuanto a los retos energéticos de nuestra sociedad, el decano de la facultad de ciencias de la Universidad Autónoma de Barcelona, Jordi Bartrolí, declaró que, de alguna forma, «deberemos volver a lo primario», entendiendo como primario aquello que obtenemos de la naturaleza, que puede ser procesado mediante técnicas accesibles y con una tasa de retorno energético claramente positiva.

En efecto, el bosque nos nutre de materias primas, de fármacos y de bienestar, y quizás en un futuro próximo se convierta de nuevo en una fuente de energía importante. Pensemos que, de entre todos los combustibles, la leña o biomasa (como se denomina genéricamente aquello producido por fotosíntesis), es el que mayor retorno energético puede proporcionar, ya que su extracción resulta especialmente económica y se comercializa a escala local. Además, su consumo puede contribuir a la conservación de la naturaleza. En la actualidad, la madera se acumula de forma incontrolada en el medio natural incrementando la carga de fuego, ya de por sí importante, que soportan muchos de nuestros espacios forestados.

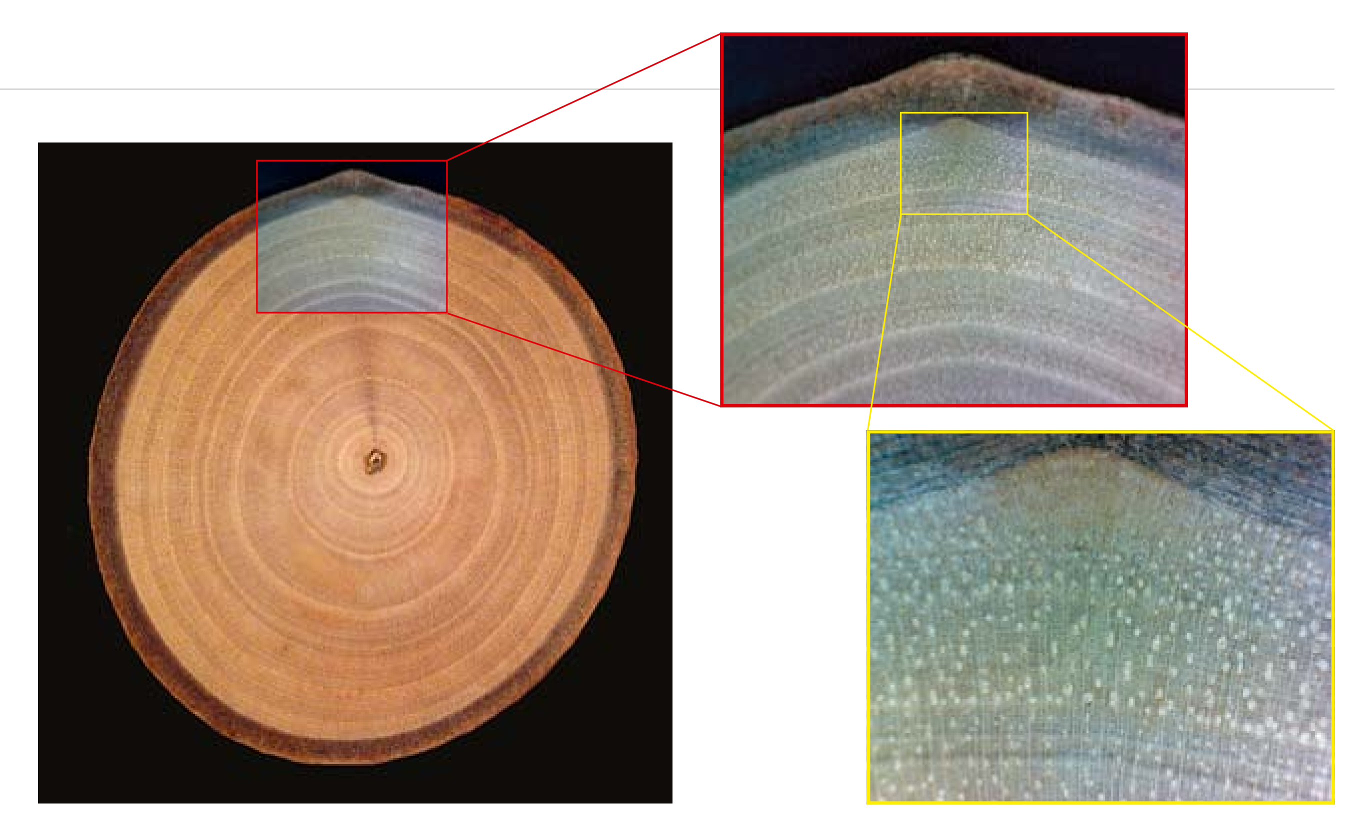
España es en este sentido un país especialmente agraciado. Extensos bosques tapizan el territorio, las hectáreas arbóreas crecen año tras año y a nadie se le escapa que una gestión racional de estos recursos redundará en beneficio de todos. Pero eso, el redescubrimiento de la silvicultura como actividad estratégica, exige conocer las propiedades de aquello que queremos utilizar. Y para tal fin solo hay una posibilidad: el estudio de los derivados forestales, en este caso la madera.

Para el científico, la madera y sus derivados son materiales de primera elección. Su fácil acceso, bajo precio, densidad reducida y facilidad de mecanizado la convierten en un material básico para la construcción de prototipos, elementos estructurales e instalaciones de labora-



Muestras de maderas de la tabla (*véase la página 88*), en el mismo orden.

MARC BOADA



Fotografía (*izquierda*) **y microscopías realizadas con un microscopio USB** (*derecha*) **de una sección de un tronco de acacia. Esta especie presenta unos anillos de crecimiento medianamente marcados; conforme nos acercamos, observamos una tupida red de canales bastante homogéneos. Las estructuras radiales, muy claras en especies como el roble, aquí son casi invisibles; ello hace que esta madera adquiera un pulido excelente y goce de gran elasticidad.**



torio. Para el tecnólogo, a estas características se suman otras de aplicación más específica: elasticidad notable en algunas especies, conductividad térmica baja, coeficiente de rozamiento reducido en las maderas duras e incluso características más subjetivas, como un tacto agradable y una amplísima disponibilidad de acabados. Es por todo ello por lo que ya en 1736, John Harrison utilizó maderas selectas para la construcción de sus célebres cronómetros náuticos y que hoy, por citar solo tres ejemplos, podemos encontrar este material en enormes edificios, esbeltos navíos y coches de fórmula 1.

En nuestro país se comercializan centenares de especies. Podemos encontrar tabloncillos de maderas nobles, de acabado impecable, secados con el máximo primor y destinados a la fabricación de instrumentos musicales, que resultan óptimos para la construcción de réplicas de instrumentos científicos antiguos. También hay un surtido importante de tablones de dimensiones descomunales; aserrados de árboles como el roble, el abeto o de distintas especies tropicales; y, finalmente, no será difícil localizar maderas propias de nuestra región, a menudo a un precio reducidísimo. Con todo, las especies comunes, las que podemos localizar en el entorno doméstico, ascienden a poco más de una docena y media; estas constituirán nuestro objetivo prioritario a la hora de crear nuestra xiloteca.

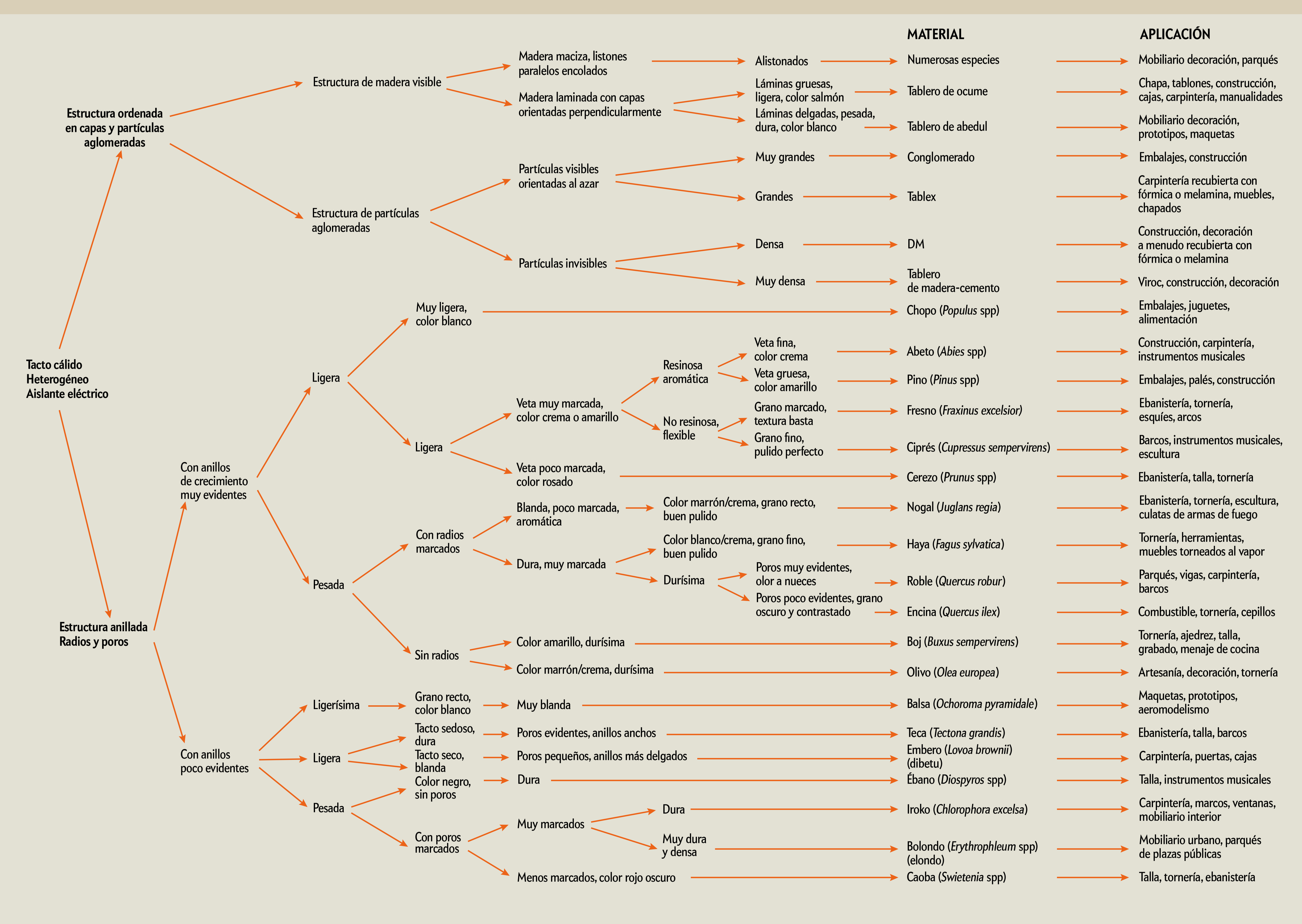
Para empezar bastará una ronda sistemática de visitas a carpinterías, ebanisterías y a algún lutier; ello nos permitirá acceder a un amplio abanico de muestras, que incrementaremos con retales provenientes de muebles antiguos, muestrarios de parqué o de construcción naval. Luego, ya en nuestro laboratorio, las prepararemos para su estudio. Mediante una sierra o lima retocaremos las caras hasta dejarlas perpendiculares al eje de la fibra y luego terminaremos las superficies mediante un lijado a fondo con un grano bien fino, siempre al hilo de la fibra.

En ese momento podremos observar cuán distintas son las estructuras según el ángulo de observación. Reparemos en que podemos visualizar la fibra vegetal bajo tres orientaciones: perpendicular, paralela y tangencial al eje del tronco. Concluimos que la madera no es en absoluto un material homogéneo; ello precisamente determina muchas de sus características. La resistencia a la compresión es mínima cuando se aplica perpendicularmente a las fibras y máxima al hacerlo en paralelo. La elasticidad se comporta justo de modo contrario.

Al microscopio todo eso se hace bien patente. La observación en sección de los largos vasos que conducen la savia resulta especialmente instructiva. Comprobaremos que la madera es un material muy poroso, constituido por largos tubos que ascienden tronco arriba entrelazados con otros, radiales, que distribuyen los nutrientes hacia la corteza. Dos sustancias materializan estas estructuras: la celulosa de las paredes celulares y la lignina, un adhesivo natural que las une. Ambas son materiales poliméricos, es decir, formados por larguísimas cadenas donde se repiten una y otra vez las mismas estructuras básicas (monómeros). De ahí que la madera compita con algunos plásticos, con la ventaja, eso sí, de que esta es sintetizada de forma natural, sin ninguna inversión de energía por nuestra parte.

La celulosa no es solo el componente principal de la madera; constituye también un compuesto óptimo para múltiples procesos industriales (pensemos en la pasta de papel o en los biocombustibles). En estos casos, deshacerse de la lignina puede ser la parte más difícil. Por otro lado, la madera en verde contiene agua, azúcares, resinas y gomas. El secado del tronco para usos técnicos tiene como objeto eliminar algunas de estas sustancias hasta estabilizar el material, garantizando así su durabilidad. El experimentador autárquico encontrará aquí un amplio campo de acción, ya que el secado no es tarea fácil. Deberemos cortar la madera cuando el crecimiento vegetativo del árbol esté detenido, normalmente en invierno.

CLASIFICACIÓN DE LAS MADERAS MÁS COMUNES



Sumergiremos las especies menos resinosas en agua, durante semanas o meses. Luego, tras unas semanas al aire pero no al sol, podremos aserrar el tronco en dimensiones adecuadas para su destino. Con cera de abejas derretida pintaremos las testas de los tablones para pasar luego al secadero. No es difícil agilizar el proceso mediante un flujo de aire caliente procedente, por ejemplo, de un captador solar térmico; mediante la regulación de la temperatura y humedad del aire ajustaremos la velocidad de secado, que puede durar algunas semanas.

Cuando la madera, o, mejor, la leña, no esté destinada a un uso técnico, podemos seguir otras estrategias en las que estos compuestos indeseables de los que hablábamos se convierten en parte del beneficio. Las industrias de derivados forestales obtienen resinas, brea o ácido piroleñoso de la pirolisis de la leña. Hoy podemos incluso hablar de las carboneras del siglo XXI, reactores en los que el control preciso del proceso y la recuperación de los condensados y gases de combustión hacen posible una producción rentable de todos estos materiales.

Decíamos que la observación microscópica era especialmente interesante. Ello se debe a que cada madera muestra un patrón característico de vasos. En la actualidad, la comparación microfotográfica resulta especialmente cómoda gracias a los microscopios que se acoplan directamente al ordenador mediante un puerto USB. Estos aparatos, de bajísimo coste en algunos casos, permiten comparar nuestras imágenes con las de atlas de referencia, lo que facilita la identificación de las muestras. Conocida la especie botánica que rinde determinada madera, descubriremos que la denominación común se halla sujeta a una sorprendente variabilidad local, un mal endémico en las especies más cosmopolitas. A menudo oiremos hablar de la teca africana, conocida también por iroko (*Chloropora excelsa*), cuando en realidad nada tiene que ver con la teca vera (*Tectona grandis*). La primera produce un polvo irritante y no adquiere el pulimento excelente de la segunda; además, su comportamiento y resistencia al agua son bien distintos. Eso sí, las dos presentan unos anillos de crecimiento menos marcados que las coníferas típicas de nuestras latitudes.

Cuando disponemos de un cierto abanico de muestras rápidamente podemos separar dos grupos principales: uno con las especies tropicales, que rinden grandes tablones exentos de nudos, con veteados regulares, uniformes y anillado discreto. El motivo es simple: en el bosque tropical las variaciones estacionales son menores y el período vegetativo más regular. En cambio, en las latitudes boreales, el descanso invernal es seguido por un rápido crecimiento, lo que se refleja en la estructura del tronco y la madera. Así, las coníferas producen maderas que alternan capas duras y delgadas con otras gruesas y blandas, y además presentan un gran número de nudos, cicatrices de ramas simétricamente dispuestas a lo largo del tronco.

Todo ello responde a dos estrategias de captación de la radiación solar. El árbol que crece en el trópico es como una sombrilla desplegada al sol, que sube velozmente para superar a los rivales con el objetivo de captar una radiación casi cenital. Por el contrario, las coníferas presentan un diseño óptimo para ofrecer una gran superficie a los rayos provenientes de un sol que se alza pocos grados sobre el horizonte. Más aún, a diferencia de los animales, los árboles crecen a lo ancho, pero no a lo alto. Un punto concreto de la corteza permanecerá a la misma altura sobre el suelo durante años, con mínimas variaciones, mientras se aleja progresivamente del eje central del tronco o gira respecto a este. Algunos árboles giran lentamente mientras exponen distintas zonas del ramaje a los puntos mejor iluminados, a menudo bajo la presión de otro árbol cercano.

Aquí empiezan las pesadillas para el tecnólogo. Las fibras reviradas, producto de la rotación del tronco, son solo uno de los múltiples defectos que la madera puede presentar. Grietas, rajaduras, alabeos, podredumbre o inclusiones minerales constituyen solo unos pocos ejemplos de toda la fenomenología que se esconde detrás de la madera como material constructivo. Problemas que se resuelven con la selección de los pies idóneos, un secado atento, un corte diligente y una manipulación experta. Es decir, un acicate para el desarrollo de las competencias técnicas necesarias para obtener las mejores prestaciones de uno de los materiales más óptimos y sostenibles que la naturaleza nos proporciona.

por Alejandro Pérez Carballo

Alejandro Pérez Carballo es profesor de filosofía en la Universidad de Massachusetts en Amherst.



Dilemas cooperativos e inducción hacia atrás (2)

Cómo perder la fe en la racionalidad del oponente

En la columna del mes de junio discutimos una variante del muy conocido dilema del prisionero. En ella, nuestros dos jugadores, Andrés y Bernardo, debían enfrentarse repetidas veces al dilema tradicional.

Recordemos que, en el dilema clásico, los protagonistas deben decidir por separado si delatar a su compañero o no. La condena que cada uno reciba dependerá de la decisión que tomen ambos. El pacto que les ofrece la policía es tal que, si ambos decidiesen cooperar, minimizarían sus respectivas penas; sin embargo, desde el punto de vista de cada uno, la decisión más racional siempre será delatar al cómplice.

El dilema tradicional describe una situación aislada, por lo que no existe ningún mecanismo que incite a cooperar. En la columna del mes de junio nos planteábamos la siguiente pregunta: ¿aparecerá dicho incentivo si obligamos a los jugadores a enfrentarse al mismo dilema repetidas veces? En otras palabras, ¿es posible que, en el dilema múltiple, la decisión racional por parte de cada uno consista en cooperar con el compañero?

Toma y daca

En los años setenta, el politólogo Robert Axelrod, de la Universidad de Michigan, organizó un torneo con el objetivo de comparar diferentes estrategias para el dilema del prisionero iterado (DPI). (En este contexto, una «estrategia» designa una función que, para cada ronda, nos dice si debemos delatar o no a nuestro compañero dependiendo de lo que haya sucedido en las rondas anteriores.)

Al torneo se presentaron catorce estrategias sugeridas por diferentes académicos de diversos campos. Cada una se enfrentó a las demás (incluyendo una copia de sí misma y una basada en actuar de modo aleatorio) en un DPI de 200 rondas. Al final, se nombró ganadora a la que obtuvo la mayor puntuación.

Poco después, Axelrod organizó una segunda versión del torneo en la que los participantes sabían qué estrategia había resultado vencedora en la primera ocasión. Se propusieron 62 estrategias, cada una de las cuales volvió a enfrentarse a las demás, a una copia de sí misma y a una estrategia aleatoria, en un DPI de 200 rondas.

Sorprendentemente, la estrategia ganadora en ambos casos fue la misma: «toma y daca» (*tit-for-tat*). Esta consiste en cooperar (no delatar al compañero) en la primera ronda; después, la estrategia dicta imitar lo que haya hecho el otro jugador en la ronda precedente.

Podemos pensar en la estrategia de toma y daca como en la de alguien que comienza de buena fe, por lo que decide no delatar al compañero en la primera ronda. Sin embargo, si en algún momento este opta por no cooperar, la estrategia recomienda tomar represalias de inmediato. Por último, si más tarde el otro jugador se arrepiente y retoma una actitud cooperadora, se le perdona y se vuelve a cooperar con él.

Si enfrentamos la estrategia de toma y daca con la que recomienda delatar siempre, esta última resultará más efectiva. Pero, en un torneo en el que compiten múltiples estrategias, la de toma y daca resultará vencedora con una alta probabilidad. (Vale la pena resaltar que en la versión clásica del dilema no sucede así: en tal caso, la estrategia ganadora es siempre la que recomienda delatar.)

Dado que a Andrés solo le interesa su propio bienestar, parece que lo que más le convendría sería adoptar la estrategia de toma y daca. Y, de hecho, si Bernardo decidiese proceder de la misma manera, ambos terminarían cooperando en cada ronda.

Racionalidad dudosa

Si bien las consideraciones anteriores parecen muy convincentes, existe un argumento que nos lleva a concluir que, aun en el caso del dilema múltiple, todo agente racional debería confesar en cada ronda.

Supongamos que Andrés y Bernardo se enfrentan en un DPI de 20 turnos. Como veíamos en la columna de junio, Andrés podría concluir lo siguiente: «En la ronda final Bernardo no tendrá nada que ganar si calla. De modo que, con independencia de lo que yo haga en los turnos anteriores, a Bernardo le convendrá delatarme. Pero Bernardo cree que yo soy racional; por tanto, en la ronda 19 deberá concluir que yo lo delataré en la ronda 20 sin importar lo que él haga en el turno anterior. Así que él me delatará en la ronda 19, pues no tendrá nada que ganar quedándose callado. Y dado que, en la ronda 18, él creerá que yo creeré que él es racional, concluirá que también lo delataré en la ronda 19. Por ende, él me delatará en el turno número 18...». La iteración de este razonamiento llevaría a cada uno de ellos a delatar al compañero en todas las ocasiones.

Merece la pena diseccionar el argumento anterior con un poco más de detalle. Los supuestos iniciales son los siguientes: (*a*) Andrés y Bernardo son racionales y a cada uno de ellos solo le interesa su propio bienestar; (*b*) Andrés y Bernardo creen que (*a*) es cierto, creen que lo creen, creen que creen que lo creen, etcétera; (*c*) Andrés y Bernardo creen que van a enfrentarse al dilema del prisionero 20 veces seguidas y que, después de cada ronda, cada uno conocerá la decisión que tomó el otro.

Las primeras dos etapas del argumento que atribuimos a Andrés pueden expresarse como sigue:

A_1: «En la ronda número 20, Bernardo va a delatarme sin importar lo que yo haya hecho en las rondas anteriores.»

***A_2*:** «En la ronda 19, Bernardo creerá que yo soy racional. Por tanto, deberá concluir que lo delataré en la ronda número 20, sin importar lo que haya ocurrido en las rondas anteriores.»

Pero ¿es realmente válido el argumento A_2?

Si Andrés pudiese asegurar que, en la ronda número 19, Bernardo creerá que él es racional, entonces podría emplear dicho argumento. Pero recordemos que lo único que garantizan los supuestos (*a*)-(*c*) es que tanto Bernardo como Andrés creen, *al inicio del juego*, que ambos son racionales, que creen que lo creen, etcétera.

Sin embargo, resulta compatible con dichos supuestos que Bernardo cambie de parecer en la ronda número 19. Por ejemplo, Bernardo podría dudar de la racionalidad de Andrés y pensar que, si él permanece en silencio en la ronda número 19, Andrés también cooperará en la ronda número 20. Por tanto, y desde el punto de vista de Andrés al inicio del juego, el argumento A_2 falla, pues Andrés no puede garantizar que en la ronda número 19 Bernardo continuará creyendo que Andrés se comporta de manera racional.

¿Qué tendría que ocurrir para que Bernardo cambiase de opinión? Si Andrés cooperase en la primera ronda, por ejemplo, Bernardo debería cambiar de parecer, ya que si Andrés fuese completamente racional no habría cooperado. El hecho de que Andrés no lo delate en la primera ronda estaría indicando a Bernardo que su compañero no siempre se comporta de manera racional.

Por tanto, y si Bernardo es perfectamente racional, en la siguiente ronda tendrá que poner en duda que Andrés lo sea. Por supuesto, Andrés cree que Bernardo cree que Andrés lo delatará en la primera ronda, ya que cree que Bernardo cree que Andrés es racional. Pero Andrés tiene que reconocer que si, contrariamente a la creencia inicial de Bernardo, él decidiese cooperar, entonces Bernardo debería cambiar de opinión.



¿Qué estrategia resultará ganadora al simular un dilema del prisionero iterado en el que se enfrentan una gran cantidad de jugadores?

Niveles de creencia

Sin embargo, la solución a nuestro problema no puede ser tan simple. Ello se debe a que existe la posibilidad de que, aun cooperando en la primera ronda, Andrés esté obrando de manera racional. ¿Cómo? Muy sencillo: Andrés podría pensar que, si coopera en la primera ronda, conseguirá que Bernardo crea que Andrés no es racional. Ello proporcionaría a Bernardo un motivo para cooperar. ¡Y Andrés podría aprovecharse de Bernardo en la ronda número 2!

Ahora bien, supongamos que Andrés decide cooperar en la primera ronda. En tal caso, para que Bernardo continúe creyendo que Andrés está actuando de manera racional, Bernardo tiene que creer que Andrés cree que Bernardo cree que Andrés *no* es racional. Pero recordemos que uno de los supuestos que habíamos utilizado para concluir que delatar siempre al compañero constituía la opción racional era que Andrés y Bernardo creen que son racionales, creen que lo creen, creen que creen que lo creen, etcétera. Ahora, sin embargo, dado que Bernardo cree que Andrés cree que Bernardo cree que Andrés no es racional, Bernardo ya no puede echar mano de uno de los supuestos necesarios para completar el argumento. Por tanto, Andrés no puede concluir que, sin importar lo que él haga en la primera ronda, Bernardo lo delatará en la segunda.

Ya disponemos de todos los elementos necesarios para resolver la paradoja. Su solución puede formularse como sigue. Diremos que la creencia de un jugador en la racionalidad común es de nivel 1 si dicho jugador cree que ambos son racionales. Y diremos que es de nivel 2 si cree que ambos creen que son racionales. En general, su creencia en la racionalidad común será de nivel $(n + 1)$ si cree que ambos creen en la racionalidad común a nivel n.

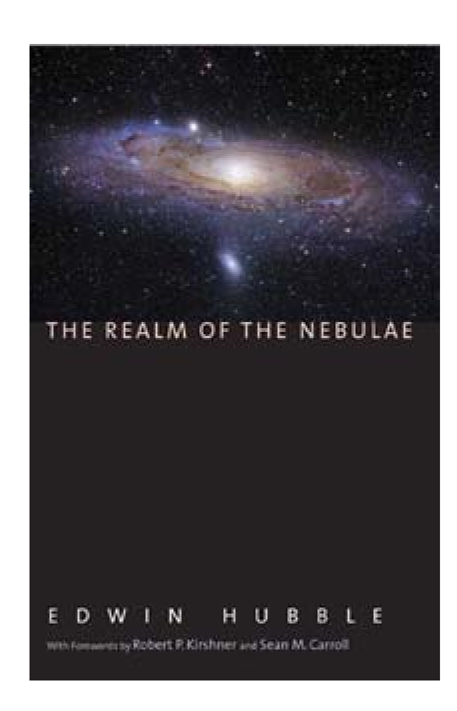
Puede verse con facilidad que, si en la ronda $19 - j$ (con $0 \leq j \leq 18$) uno de los dos jugadores decide cooperar, entonces su compañero se verá obligado a modificar sus creencias: a partir de ese momento, su nivel de creencia en la racionalidad común no podrá ser superior a $j + 1$. Puesto que Andrés y Bernardo saben que cada uno de ellos siempre puede decidir cooperar en algún momento, al comienzo del juego ninguno se encuentra en condiciones de asegurar que, en las rondas ulteriores, su nivel de creencia será lo suficientemente elevado como para concluir que su compañero lo delatará en todas las rondas.

En cuanto a la paradoja del examen sorpresa que propusimos en la columna anterior, el lector podrá comprobar que admite una solución muy similar.

PARA SABER MÁS

La solución que hemos discutido aquí aparece en el artículo de Philip Pettit y Robert Sugden **The backward induction paradox** (*The Journal of Philosophy*, vol. 86, n.º 4, págs. 169-182, 1989), así como en **Modeling Rational Players: Part I**, de Ken Binmore (*Economics and Philosophy*, vol. 3, n.º 2, págs. 179-214, 1987). Una solución similar para la paradoja del examen sorpresa fue propuesta en los años setenta por Saul Kripke; al respecto, véase **On two paradoxes of knowledge**, en *Philosophical Troubles*, Oxford University Press, 2011, págs. 52-74.

Este tipo de soluciones tienen sus límites. Como ejemplo, véase **Backwards induction in the centipede game**, por John Broome y Wlodek Rabinowicz (*Analysis*, vol. 59, n.º 4, págs. 237-242, 1999).



THE REALM OF THE NEBULAE

Por Edwin Hubble. Prólogos de Robert P. Kirshner y Sean M. Carroll. Yale University Press; New Haven, 2012.

Hubble. Cosmología

Uniformidad y expansión del universo

Cuanto la cosmología enseña halla en este libro sus dos pilares fundamentales; a saber, la uniformidad a gran escala y la expansión del universo observable. Demostró su autor que las nebulosas espirales eran universos isla independientes, situados allende los confines de nuestra galaxia. Edwin Powell Hubble, nacido en 1889 en Marshfield y autor de esa obra clásica, inició su formación superior en la Universidad de Chicago. Con una beca Rodes se trasladó a Oxford en 1910. En 1914 tornó a la Universidad de Chicago y a su observatorio Yerkes. Participó en la Primera Guerra Mundial. Terminada, se incorporó al observatorio de Monte Wilson. Su disertación doctoral, defendida en 1917, fue una investigación fotográfica de las nebulosas, retazos de firmamento ligeramente obscurecidos, de los que entonces se sabía muy poco. Había nebulosas que constituían aglomeraciones de polvo y gas, pero la mayoría eran cúmulos estelares alejados. Por recomendación de Robert Millikan obtuvo un puesto en el observatorio de Monte Wilson, que ocupó al acabar la guerra. Hubble trabajó allí hasta su muerte, en 1953.

En el siglo xviii, mucho antes de que las observaciones alcanzaran la calidad suficiente para distinguir entre estructuras remotas, Immanuel Kant consideraba universos isla a las nebulosas espirales, conjuntos de estrellas semejantes al de la Vía Láctea. A esta tesis se oponían quienes defendían que las nebulosas espirales representaban la formación de estrellas individuales y sistemas solares. Pierre Simon de Laplace, que abanderaba la segunda opción, dedujo matemáticamente que el polvo y el gas en condensación adquirían una conformación discoidal. El debate entre la postura kantiana y la laplaciana, aunque se centró en la naturaleza de las nebulosas, poseía implicaciones cruciales para el universo entero. Si Kant tenía razón, los universos isla (galaxias) se distribuirían con regularidad uniforme por todo el espacio. Si estaba de parte de Laplace, estrellas, planetas y nebulosas se hallarían confinadas en determinada región del espacio, rodeado por el vacío. La controversia llegó hasta el siglo xx. Culminó en un Gran Debate formal entre Harlow Shapley y Heber Curtis en 1920. Shapley abogaba por un pequeño universo, mientras que Curtis defendía una distribución de universos isla. Dirimirían los datos.

Antes de Albert Einstein, las cuestiones cosmológicas se planteaban en el marco de la teoría newtoniana sobre el espacio y el tiempo, paradigma dominante durante varios siglos. Newton imaginaba un espacio absoluto y eterno, en cuyo seno se movía la materia, sometida a la fuerza atractiva de la gravedad. En un universo uniforme, cabía imaginarse que una galaxia pudiera permanecer estacionaria por siempre. Einstein revolucionó la creencia newtoniana con su teoría general de la relatividad. En su teoría especial de la relatividad, de 1905, había disuelto ya el espacio y tiempo de Newton, distintos, en un único cuadro unificado del espaciotiempo. En la relatividad general, de 1915, permitía que el espaciotiempo se doblara. Para Einstein, la gravedad era una fuerza que se movía a través del espaciotiempo, como la electricidad o el magnetismo.

Einstein añadió un nuevo término a sus ecuaciones: la constante cosmológica, que operaba contra la atracción gravitatoria ordinaria de la materia. De acuerdo con la relatividad general, un universo uniforme relleno de materia tiende a reducir su velocidad si está en expansión y a contraerse hasta una densidad infinita si se encuentra en contracción. La constante cosmológica, por el contrario, aporta un empuje perpetuo a la expansión del espacio. Merced a ese artefacto *ad hoc*, la relatividad general nos permite una cosmología sin cambios, lo que se conoce por «universo estático de Einstein». El universo estático de Einstein tiene un tamaño finito.

Willem de Sitter formuló en 1916 un modelo estático con desplazamientos aparentes (no reales) hacia el rojo en los espectros de nebulosas mayores y situadas a grandes distancias. Un corrimiento de una línea espectral hacia el rojo del espectro indica que el objeto se está alejando del observador. Shapley determinó, en 1918, la distancia hasta los cúmulos globulares. De ello pareció inferirse que el universo era una unidad única e ingente. Modelo de universo isla que Hubble no tardó en arruinar.

En 1925, Knut Lundmark se valió de datos obtenidos sobre 44 nebulosas para avanzar una ley que conectaba velocidad con distancia. Pero fueron los resultados laboriosamente obtenidos por Hubble y por él anunciados en 1929 lo que terminó por convencer a la comunidad astronómica de que el universo se estaba realmente expandiendo. Ese año, Hubble sometió a prueba la predicción de De Sitter. Poseía distancias de numerosas nebulosas extragalácticas y corrimientos al rojo medidos, bajo su dirección, por Milton Humason en Monte Wilson. Los corrimientos al rojo eran mayores cuanto mayor era la distancia. La relación empírica entre corrimiento al rojo y distancia (entre corrimiento al rojo y tamaño o brillo, indicaciones inequívocas de distancia) vinieron a entenderse como una correlación entre velocidad y distancia. Las nebulosas más alejadas se estaban distanciando de nosotros a velocidades cada vez mayores en un universo en expansión, no estáti-

co. Aunque se sabe que solo nos es dado observar una pequeña región del firmamento, muestra que el cosmos presenta la peculiaridad notable de manifestarse uniforme a gran escala. Vemos galaxias que siembran el espacio, con un número bastante parejo y típico. Por consiguiente, centrándonos en una sección del cielo, conocemos el cielo entero.

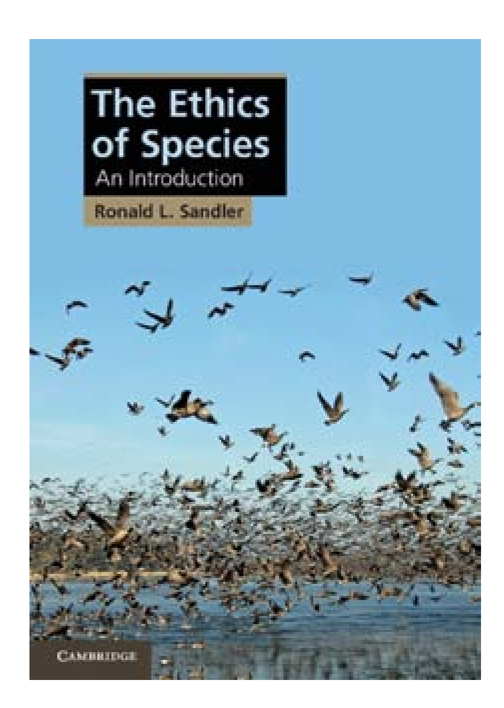
Hubble utilizó las estrellas variables cefeidas y la relación entre período y luminosidad descubierta por Henrietta Leavitt para establecer que las nebulosas espirales se encontraban allende la Vía Láctea. Las masas borrosas que denominamos nebulosas eran, en realidad, imponentes galaxias. La materia del universo no se hallaba confinada a una región aislada; se agrupa en galaxias y cúmulos galácticos, que se encuentran dispersos más o menos homogéneamente por todo el espacio. En 1929, midió, en efecto, las velocidades de recesión de 18 galaxias. Descubrió que tales velocidades aumentaban en proporción con su distancia de la Tierra. La relación de marras ($v = Hd$) se conoce ahora por ley de Hubble. La constante de proporcionalidad —que cifró en 500 kilómetros por segundo y por megapársec— es la constante de Hubble (H). Este trabajo aportó la primera prueba directa de un universo en expansión, un concepto que había sido propuesto por los cosmólogos Friedmann y Lemaître, y que ahora resulta fundamental para entender el universo.

La ley de Hubble se basó en el corrimiento hacia el rojo del espectro y el principio Doppler, para indicar que el universo se expandía. Los textos un tanto ambiguos sobre ese particular dan a entender que pudo pensar que el incremento observado en el corrimiento hacia el rojo con la distancia tendría otras causas. Una prudencia que se comprende. Las observaciones de Hubble significaban que podían calcularse dos magnitudes fundamentales del universo: su tamaño cognoscible, o la distancia a la que la velocidad de recesión alcanza la velocidad de la luz, que es unos 18.000 millones de años luz; y la edad del universo, que el propio Hubble cifró en unos 2000 millones de años, aunque los cómputos modernos lo cifran entre 12.000 y 15.000 millones de años. Hubble introdujo también un sistema de clasificación sobre la forma de las galaxias, que se convirtió en criterio canónico.

Lo que llamamos ley de Hubble es la relación aproximada entre la distancia a la que se encuentra una galaxia y su velocidad aparente. Las galaxias más remotas tienden a alejarse más deprisa de nosotros, con una velocidad aparente proporcional a su distancia. Hablamos de velocidad aparente porque lo que realmente observamos es el corrimiento hacia el rojo. En un universo newtoniano, tal corrimiento emerge del efecto Doppler: cuando un objeto en movimiento emite ondas, la longitud de onda se comprime (corrimiento al azul) o se expande (corrimiento al rojo) si el movimiento se acerca a nosotros o se aleja. En un universo einsteiniano, por otro lado, existe una explicación alternativa: no hay galaxias que se muevan sino que es el propio espacio el que se está expandiendo, estirando la longitud de onda de la luz que viaja en su camino.

Cuando Hubble y Humason mostraron que el universo real no era estático, perdió su razón de ser la constante cosmológica. El propio Einstein pareció lamentar más tarde su «grave error». Para Hubble las galaxias más lejanas se hallaban a unos diez millones de años luz. Con las técnicas modernas medimos distancias a las galaxias de varios miles de millones de años luz. Así como Hubble se sirvió de las estrellas variables Cefeidas como parámetro luminoso, nuestra técnica más avanzada utiliza un tipo de explosión estelar conocido por supernova de tipo Ia. Por razones que no acaban de conocerse plenamente, el brillo máximo intrínseco de esas supernovas viene a ser el mismo a través del universo. Persistía abierta la cuestión de cuánta energía había en el espacio vacío. La solución apareció en 1998 cuando dos grupos de astrónomos (entre ellos, Robert Kirshner) anunciaron que nuestro universo no solo se halla en expansión, sino que se está acelerando.

—Luis Alonso



THE ETHICS OF SPECIES. AN INTRODUCTION

Por Ronald L. Sandler. Cambridge University Press; Cambridge, 2012.

Ética aplicada

Criterios normativos en el tratamiento de las especies

Dividido en dos grandes secciones, la primera parte de este libro aborda el valor de las especies, para una conservación fundada de las mismas y la gestión adecuada de los ecosistemas en un marco de cambio climático global. Se consagra la parte segunda a la significación ética de los límites o fronteras de las especies, que condicionan su modificación experimental y la creación de otras nuevas.

Las relaciones del hombre con el resto de la naturaleza han alcanzado cotas críticas. Hemos provocado que las especies se extingan a una velocidad celerísima en comparación con cualquier otro momento de los últimos 65 millones de años. La extinción de fondo, normal, se cifra en una especie por millón y año. Aunque las estimaciones varían. Con los datos disponibles se habla de 10.000 especies extinguidas por millón y año. La mitad de las especies se extinguirían hacia 2100. Se

impone una normativa, un criterio ético para frenar tamaño desastre. Para orientarse en el nuevo campo emergente de la ética de la naturaleza, habrá que abrir el libro por su último capítulo, donde se recapitulan en diez enunciados las tesis del autor.

De acuerdo con dicho prontuario: 1) solo algunas especies en particular y la biodiversidad en general presentan un valor instrumental; 2) solo algunas especies en particular y la biodiversidad en general obtienen un valor subjetivo; 3) las especies carecen de un valor objetivo, intrínseco; 4) las especies carecen, asimismo, de un valor objetivo histórico; 5) todos los individuos, incluidos los privados de sensibilidad, poseen valor intrínseco; 6) el estatuto moral de una entidad viene condicionado por su valor; 7) las capacidades, y no la pertenencia al grupo, justifican el estatuto moral; 8) los límites de las especies no poseen ningún significado ético objetivo; 9) los límites de las especies tienen, en cambio, un significado ético subjetivo; 10) los límites de *Homo sapiens* no gozan de un significado ético exclusivo y diferente. De ese decálogo extrae el autor diversas consecuencias para la pervivencia de las especies en el marco de un cambio climático acelerado, para la creación de individuos interespecíficos y la generación de especies novedosas. También para el fenómeno de la potenciación humana.

No solo causamos la desaparición irreversible de especies. El hombre modifica la naturaleza mediante técnicas de ingeniería genética. Aunque la manipulación intencionada de las especies se ha venido produciendo desde la introducción de la agricultura a través del cruzamiento, selección, hibridación o injerto, los procedimientos de ADN recombinante insertan genes de unos individuos en otros, incluso de especies distintas. Así, se han manipulado levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*) para que produzcan una concentración elevada de ácido artemisínico (precursor de la artemisina, una droga contra la malaria) mediante trasplante, en la levadura, de genes procedentes de *Artemisia annua*, la fuente tradicional de artemisinina, y diversas especies bacterianas, que codifican la vía metabólica requerida. Se ha sintetizado el genoma entero de *Micoplasma mycoides* y lo han insertado en otra cepa bacteriana distinta, logrando en esta iniciar los procesos metabólicos de *M. mycoides*.

Tales procedimientos han venido a complicar el concepto de especie y su definición. Hay un elenco largo de definiciones divergentes. Unos autores atienden al aislamiento reproductor; otros a la filogenia y evolución; otros a la ocupación de un nicho ecológico característico; quienes a los perfiles genéticos; otros repiten el viejo método morfológico que distingue según la constitución anatómica. Ante semejante situación algunos se han planteado si es correcto hablar de un concepto universal de especie (monismo de especie) o existe una legítima pluralidad de conceptos de especie (pluralismo de especie). A esta cuestión suele ir asociada la de si las especies son categorías reales en las que se dividen los organismos en razón de sus peculiaridades (realismo de especie) o si son meras estipulaciones arbitrarias (convencionalismo de especie) para imponer un orden en el dominio de los seres vivos. Cuanto se predique de las especies deberá predicarse de los límites de las especies. Acontece, además, que se han propuesto múltiples definiciones de biodiversidad: diversidad genética, funcional y diversidad beta, entre otras. La postrera concierne a la diversidad entre áreas y ecosistemas; cuanto mayor es la diversidad beta entre dos o más sistemas, más especies se encuentran en un sistema.

Se le da categoría de axioma al enunciado de que las especies presentan un valor, que merece ser protegido. Pero se discrepa en torno al tipo de valor que presentan y los criterios que los regulan. Hay valores instrumentales y valores finales. De un valor se dice que es instrumental si constituye un medio para alcanzar un fin. El valor instrumental deriva siempre del fin al que sirve; no es absoluto, sino condicional. De un valor se dice que es final cuando se posee por sí mismo, por su propia naturaleza; es independiente de cualquier preferencia, actitud, juicio, emoción o estado. El valor objetivo se descubre, no se crea. En cambio, el valor subjetivo es creado por los evaluadores a través de sus juicios o preferencias; ni existe antes, ni es independiente de ellos. De acuerdo con el tipo de valor de las especies, así debería ser su gestión en el ecosistema. Algunos defienden la gestión de la biodiversidad y de especies particulares que satisfacen máximamente las actuales exigencias económicas, médicas, materiales y recreativas. Otros defienden la conservación de la biodiversidad con la esperanza de que determinadas especies pudieran resultar útiles en el futuro en una aplicación que no podemos todavía columbrar, es decir, sobre la base de su valor opcional. Los hay que sostienen que las especies y la biodiversidad poseen un valor final subjetivo en razón de las preferencias o apreciaciones, que deben guiar las prácticas ambientalistas. Y están por fin los que defienden que las especies presentan un valor final objetivo en sí mismas, haya o no quien las valore. Presentan un valor intrínseco. Sin olvidar, dentro de estos, quienes le reconocen a algunas especies un valor histórico por su función única en la evolución de la vida.

Pertenece a la ética no solo evitar la destrucción, sino impulsar de forma activa la conservación. Se llama in situ a la conservación de una especie o población en su hábitat. Difiere de la conservación ex situ, que se refiere a la conservación fuera de su hábitat, como los zoos o bancos de semillas. Puesto que la conservación in situ se guía por el contexto histórico y evolutivo, no resulta sorprendente que busque la promoción de especies endémicas y la remoción de especies foráneas, pues las primeras mantienen mejor la integridad ecológica y biodiversidad. Mas, aunque la mayoría de las especies invasoras suelen ser problemáticas, no todas producen pérdidas económicas, ni arruinan los servicios del ecosistema, ni ponen en peligro las comunidades preexistentes. Antes bien, aumentan la riqueza de especies, así como la diversidad filogénica y genética de la zona. Se ha puesto particular énfasis en la denominada colonización asistida (también, migración asistida o reubicación gestionada), es decir, al traslado intencionado de individuos de una especie de un lugar a otro más allá de su hábitat.

No solo existen variaciones dentro de la especie. Los organismos transgénicos comprenden híbridos interespecíficos y quimeras interespecíficas. Los híbridos interespecíficos son organismos cuyas células contienen material genético procedente de más de una especie. En un híbrido, el material genético de varias especies se combina a nivel celular. Ese material genético recombinado se presenta a través de las células del organismo. Por su parte, las quimeras interespecíficas son organismos que presentan células derivadas de individuos de más de una especie. Más que poseer células que contienen material genético de varias especies donantes, las quimeras interes-

pecíficas constan de células procedentes de especies diversas.

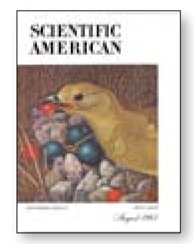
Ambas prácticas (hibridación interespecífica, a través del ADN recombinante y genómica sintética, y quimerización interespecífica, a través de inyección de células madre, injerto de tejidos, enucleación de oocitos e inserción de ADN) encierran potencial para producir individuos que dilatan el horizonte de las fronteras de especie. Por lo demás, los individuos interespecíficos no constituyen ninguna novedad en biología evolutiva. Pero muchos se cuestionan si la creación intencionada de tales individuos es legítima desde el punto de vista ético. Por razones intrínsecas y no extrínsecas o consecuenciales. Sostienen que la creación intencionada de organismos transgénicos o interespecíficos es cuestionable o inmoral, con independencia de las consecuencias que ello comporte.

La réplica a esa objeción muy extendida se basa en el argumento de que los individuos interespecíficos son habituales en la naturaleza. En contrarréplica se aduce que asuntos y acontecimientos que se reputan abominables cuando los realiza el hombre no son infrecuentes en la naturaleza: copulación forzada, reducción selectiva de recién nacidos, etcétera. Que se den en la naturaleza no nos justifica que lo haga el hombre. Vinculado con este planteamiento es el argumento de lo antinatural: si algún tipo de acontecimiento no ocurre ni puede ocurrir en la naturaleza, con independencia de la facultad del hombre, entonces no cabe (es éticamente reprobable) que el hombre produzca intencionadamente ese acontecimiento o proceso. Podemos ejemplificarlo en quienes se oponen a los cultivos genéticamente modificados. Los consideran antinaturales. Sin embargo, es palmario que hay posibilidades que solo son alcanzables gracias al hombre (desde la tostadora hasta el ordenador). El hecho de que algo no lo produzca la naturaleza a través de la evolución no quiere decir que sea cuestionable.

Contra la creación intencionada de individuos interespecíficos se oponen también los que abogan por una debida integridad del genoma del organismo sometido a ingeniería genética. Por integridad se entiende el interés del organismo, su bienestar, que no sufra daño. Así, el Comité Holandés de Biotecnología Animal declara: «Las intervenciones de la biotecnología no son solo un problema en razón de los efectos negativos potenciales sobre la salud y bienestar de los animales, sino también en razón del cambio de su material genético, que interfiere en su identidad. Mediante la modificación genética de los animales, sus propiedades son deliberada y específicamente cambiadas en beneficio del hombre. Esas modificaciones constituyen una violación de la integridad genotípica del animal». Esa violación de la identidad la llevan al extremo los reduccionistas que dicen que el organismo deja de ser tratado como un ser vivo para manejarse como una máquina química.

—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Agosto 1963

Sueños supersónicos

«Estimulada por los veinte meses de actividad del plan franco-británico para construir un reactor de transporte comercial supersónico, la Administración ha solicitado al Congreso la concesión de hasta 750 millones de dólares para el desarrollo de un avión de esas características por fabricantes estadounidenses. Se cree que el costo de ese desarrollo, estimado en mil millones de dólares, resultaría excesivo para la empresa privada. Sería esta la primera vez en que el Gobierno hubiera subvencionado directamente la creación de un avión comercial. Najeeb E. Halaby, director de la Agencia Federal de Aviación, prevé que estará operativo antes de 1971. Halaby cree posible producir un avión más rápido que el franco-británico Concorde y presentarlo más o menos al mismo tiempo.»



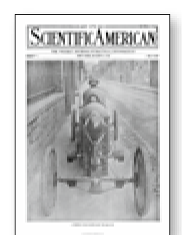
Agosto 1913

De la rivalidad a la guerra

«En un número reciente de *La Nature* aparece una apreciación crítica sobre la potencia aeronáutica relativa de Alemania y Francia. En la medida en que ambas potencias han rivalizado en pos de lo que podríamos llamar la supremacía aérea, nuestros lectores hallarán de indudable interés las afirmaciones contenidas en un artículo de nuestro contemporáneo francés. Si la situación actual de la flota aérea es materia secreta, los planes y proyectos lo son doblemente. La inferioridad francesa resulta obvia, así como los esfuerzos franceses para atenuarla.»

La mosca tsetsé

«Las islas Sesse, en el lago Victoria, son una joya de la naturaleza. Pero, pese a la exquisitez del escenario, las Sesse constituyen un osario. La muerte se cierne sobre ellas. Allí reina el silencio. No se oyen voces infantiles; los cantos de las mujeres baganda, tan llenos de cadencia, ya no atraviesan las aguas. Los poblados de chozas de corteza de árbol que durante siglos albergaron la más bella de las razas africanas, de mente y cuerpo, se han convertido en ruinas putrefactas. ¿Por qué esa desolación de todo vestigio humano? Por culpa de un sueño mortal. ¿Su causa? Una mosca que engendra el más diminuto de los asesinos de este mundo.»



Agosto 1863

Arte estadounidense en el extranjero

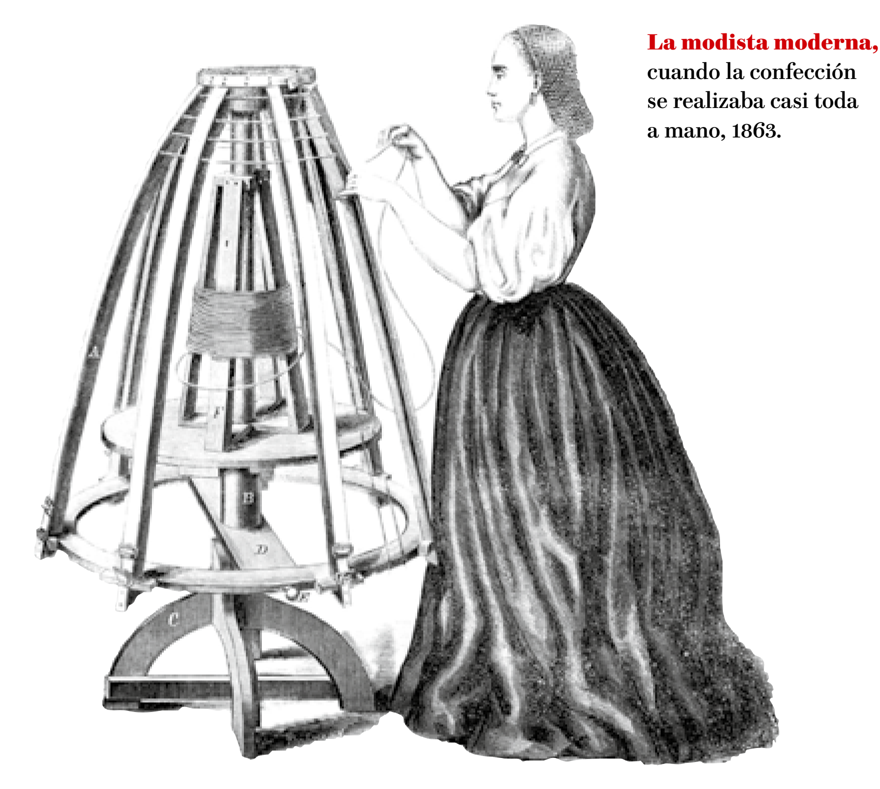
«Dice el *London Times*: "El señor [Frederich] Church, el pintor paisajista más destacado de Estados Unidos, ha sido presentado en este país con su *Niágara* y su *Corazón de los Andes*. Su *Iceberg frente a la costa del Labrador*, ahora exhibido en la Galería Alemana, ofrece una excelente oportunidad para acercarse a los objetivos y los logros del paisajismo en aquel país. El cuadro en su conjunto representa un magnífico ejemplo de cómo aplicar la técnica paisajística para plasmar unas vistas de la naturaleza grandiosas, de enorme belleza y desconocidas, solo accesibles merced a arduos esfuerzos y la exposición a los elementos, incluso con peligro para la vida o de sufrir graves lesiones."»

El Sol

«Si el Sol estuviera compuesto de carbón, con el ritmo actual duraría solo 5000 años. Con toda probabilidad, el astro no corresponde a un cuerpo en combustión, sino a uno incandescente. Su luz es más como el fulgor de un metal fundido que como la de un horno de cocción. Pero resulta imposible que el Sol esté emitiendo constantemente calor, sin perderlo o sin reponer combustible. Suponiendo que su calor se haya mantenido gracias a los cuerpos meteóricos que caen en él (de lo que se han aportado pruebas), a partir de la masa del sistema solar se puede determinar el período aproximado durante el cual el astro ha estado despidiendo luz. Ese tiempo se halla entre los 100 millones y los 400 millones de años.»

Máquina de confección

«La reñida competencia que existe en algunas ramas del comercio obliga a aprovechar cualquier dispositivo o recurso que pueda facilitar la actividad. Ello se aplica especialmente en la manufactura de faldas de aro, donde mucho depende de la calidad y la cantidad del trabajo que una operaria pueda conseguir. El bastidor de falda que se ilustra significa un gran avance respecto a los antiguos, de uso generalizado.»



La modista moderna, cuando la confección se realizaba casi toda a mano, 1863.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. IX, N.º 5, 1 DE AGOSTO DE 1863

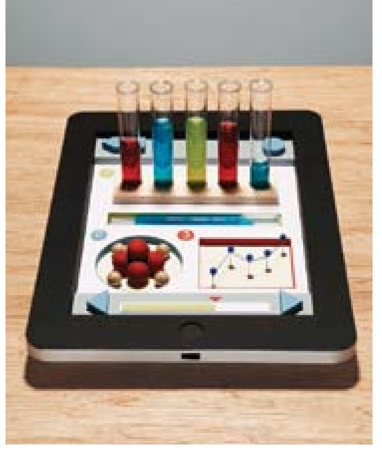


MEDICINA

Poner fin a la ceguera

Pawan Sinha

La cirugía realizada a niños ciegos de la India permite que vean por primera vez en su vida y revela los mecanismos cerebrales de la visión.



MATEMÁTICAS

De Galois a los cuerpos finitos

Antoine Chambert-Loir

Si bien corta, la carrera científica de Évariste Galois cosechó hallazgos que marcarían el rumbo de las matemáticas.

INFORME ESPECIAL
LA EDUCACIÓN EN LA ERA DIGITAL

Las TIC van a la escuela

La redacción

MOOC, entre la esperanza y la publicidad

Jeffrey Bartholet

Tecnología para la personalización de la enseñanza

Seth Fletcher

Luces y sombras de la educación digital

José Luis Rodríguez Illera

ASTRONOMÍA



La eclosión de mundos lejanos

Michael D. Lemonick

Nuestra galaxia posee abundantes planetas. Los científicos escudriñan sus atmósferas en búsqueda de indicios de vida extraterrestre.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Voss

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Barcelona
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14 - 08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

Madrid
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Manuel González Mañas: *Los costes sociales del estrés*; Alberto Ramos: *Cristales temporales y Bayesianismo cuántico*; Andrés Martínez: *La vida bajo nuestros pies* e *Imitación vocal en el mundo animal*; Marta Portero Tresserra: *Romper la barrera cerebral*; Claudi Mans: *Fisuras en la tabla periódica*; Xavier Roqué: *Historia de la ciencia*; Juan Pedro Adrados: *Cuatro noches estrelladas*; J. Vilardell: *Hace...*; Bruno Moreno: *Apuntes*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España